JOSÉ MIGUEL VIÑAS

Nuestro reto climático

Todavía estamos a tiempo de saldar nuestra deuda con el mundo y construir un futuro mejor

ALFABETO

JOSÉ MIGUEL VIÑAS

Nuestro reto climático

Todavía estamos a tiempo de saldar nuestra deuda con el mundo y construir un futuro mejor

ALFABETO

José Miguel Viñas

NUESTRO RETO CLIMÁTICO

Todavía estamos a tiempo
de saldar nuestra deuda
con el mundo y construir
un futuro mejor

ALFABETŌ

Primera edición en esta colección:

septiembre de 2022

© José Miguel Viñas, 2022

© del prólogo, Javier Martín Vide, 2022

© de la presente edición: Editorial Alfabeto, 2022

Editorial Alfabeto S.L.

Madrid

www.editorialalfabeto.com

ISBN: 978-84-17951-31-3

Ilustración de portada: Alba Ibarz

Diseño de colección y de cubierta: Ariadna Oliver

Diseño de interiores y fotocomposición: Grafime Digital S. L.

Reservados todos los derechos. Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos. Si

necesita fotocopiar o reproducir algún fragmento de esta obra, diríjase al editor o a CEDRO (www.cedro.org).

ÍNDICE

PRÓLOGO, de Javier Martín Vide

PREFACIO

I. EL CAMBIANTE CLIMA TERRESTRE

El calentamiento global primigenio

Alternancia de frío y calor

Bolas de nieve

Climatología forense

Hijos del clima

II. LA SINGULARIDAD DEL CAMBIO CLIMÁTICO ACTUAL

Rapidez y vulnerabilidad

Cuestión de confianza

CO2 hasta en la sopa (caliente)

Instalados en la zona roja

La nueva normalidad

III. CONEXIONES CLIMÁTICAS

Del clima al sistema climático

Acción-reacción en la atmósfera

Algo pasa en el Ártico

Groenlandia y la Antártida bajo lupa

Olas de calor marinas

IV. UN FENÓMENO GLOBAL CADA VEZ MÁS LOCAL

La nueva conversación de ascensor

La globalización del calor extremo

Más energía disponible

Filomena y Lucifer

Calores mortales y adversidades varias

V. PROYECCIONES Y ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO

Una emergencia emergente

Pase de modelos

Cinco caminos a elegir

Descarbonizar el mundo

Un profundo cambio social

Las migraciones climáticas

El negacionismo

VI. SORPRESAS CLIMÁTICAS

Territorios ignotos

Emisiones de metano

Claves oceánicas

EPÍLOGO. UN RETO SIN PARANGÓN EN LA HISTORIA HUMANA

LA BIBLIOTECA DEL CLIMA

AGRADECIMIENTOS

A mi querido suegro,

José Antonio González,

allá donde esté.

PRÓLOGO

El mundo actual se caracteriza, a cualquier escala de análisis (desde la global a la local), por su complejidad, por la aceleración de los cambios que en él se producen y por la incertidumbre sobre el futuro, incluso el próximo. Se dibuja así un planeta acelerado y cambiante que, además, se nos ha hecho pequeño. Los aproximadamente 40.000 kilómetros de la circunferencia terrestre son hoy los que acumulan, en apenas unos años, los cuentakilómetros de nuestros automóviles, pues tal es nuestra movilidad y capacidad de desplazamiento en un contexto de globalidad. En este planeta pequeño vivimos ya cerca de ocho mil millones de humanos (que serán prácticamente diez mil millones en 2050), y cada día consumimos una cantidad ingente de recursos y producimos un volumen enorme de residuos. En 2021 necesitábamos 1,7 planetas Tierra para cubrir las necesidades anuales de recursos y servicios ecosistémicos, lo que significa que estábamos produciendo, y ya desde hace tiempo, una deuda ecológica, que tendrán que afrontar las generaciones futuras. Desde las últimas dos décadas del siglo XX, nuestro impacto en el medio tiene una escala de afección global, y la primera manifestación de ello, ya claramente visible, es el calentamiento global, una nueva realidad que, muy pronto, dejará de tener el carácter de novedad.

El calentamiento global actual es la principal manifestación del cambio climático antrópico, pero no la única. Es un fenómeno rotundo y general, aunque desigual y del que ya puede afirmarse que es inequívoco en su causa. El aumento de la temperatura del aire en superficie es de prácticamente 1,2 ˚C con respecto al valor de referencia, el de la temperatura media de la segunda mitad del siglo XIX. En particular, la cuenca del Mediterráneo y sus tierras circundantes son particularmente sensibles al fenómeno. Han experimentado un aumento de la temperatura paralelo al planetario, pero con una tasa algo mayor, de prácticamente un grado y medio (de hot spot [punto caliente] se califica a esta

región).

El cambio climático no es una novedad en la larga historia geológica de la Tierra. Como es sabido, en los 4.500 millones de años de existencia del planeta ha habido muchos cambios climáticos, algunos de gran magnitud. La novedad del actual es su causa, por primera vez antrópica. Puede afirmarse que nuestro sistema socioeconómico, consumista y dependiente de los combustibles fósiles, se ha convertido en el sexto componente del sistema climático, constituido por la atmósfera, el océano, la superficie emergida, la biosfera y la criosfera. Los humanos somos ya capaces de alterar las componentes naturales del sistema climático a una escala global. Dejamos huella visible en el conjunto del planeta. Por tanto, el clima futuro dependerá no solo de la actividad solar y de la volcánica, y de otras causas naturales (como ocurrió en el pasado y lo seguirá haciendo en el devenir de los tiempos), sino también de cómo actuemos nosotros. Tenemos, pues, una gran responsabilidad para nuestros congéneres y los demás seres vivos.

Cada uno de nosotros ha de asumir éticamente, aun sabiendo que no resolverá por sí solo el problema, las pautas de sostenibilidad y los buenos hábitos de contención en el consumo, de movilidad activa, de implicación responsable en las opciones que rebajen nuestra huella en el medio, etc. Y algunas personas, dotadas para la comunicación y con el conocimiento profundo de la problemática, añaden a su responsabilidad personal la labor impagable de la comunicación y la divulgación rigurosa para que podamos comprender lo que está ocurriendo y a lo que nos enfrentamos. Este es el caso del autor del presente libro.

José Miguel Viñas es, sin duda, un extraordinario comunicador, que une a su sólida formación científica, como físico, una gran capacidad de transmisión del conocimiento y de empatía con el destinatario, sea el oyente radiofónico, el seguidor de sus vídeos o el lector de sus libros y artículos. Nos ha regalado magníficos libros —ya nueve—, donde aprende el gran público, el estudiante y hasta el especialista. Baste recordar su reciente Conocer la Meteorología. Diccionario ilustrado del tiempo y el clima (2019), soberbio diccionario, difícilmente superable en español, de términos de las

ciencias de la atmósfera o vinculados a ellas.

Desde hace un cuarto de siglo divulga el conocimiento de la atmósfera y, en conjunto, del sistema climático en todo tipo de medios y plataformas. Ahora, en la obra que tengo el honor de prologar, aborda directamente el cambio climático con un enfoque reflexivo, a modo de ensayo sobre la problemática, dirigido a un lector interesado en el tema o atento a la actualidad y la evolución del mundo. Encuadra la realidad de un planeta siempre en cambio físico retrotrayéndose a la Tierra primigenia y a la atmósfera en formación o explicando el impacto climático de las grandes erupciones volcánicas. Nos recuerda el clima del pasado remoto en un ejercicio de «climatología forense» y la forzosa adaptación de nuestros antepasados homínidos a los ciclos glaciales del Cuaternario.

La problemática del CO2 y de los otros gases de efecto invernadero está perfectamente resumida. El papel del hielo, especialmente el de la cuenca del Ártico, la región más crítica del planeta en cuanto al calentamiento, ocupa destacadas páginas de la obra. De un modo fácilmente comprensible, describe las diferentes vertientes del cambio climático actual con información referencial, lo que permite apreciar sus diferentes facetas, no exclusivamente físicas o ambientales. Selecciona objetiva y adecuadamente los datos y las informaciones para evitar que el lector se pierda en el bosque del exceso informativo, que conduce a menudo a la desinformación o a la desconexión.

En Nuestro reto climático José Miguel Viñas quiere captar la atención del lector en lo esencial de los procesos y sus efectos, por lo que sobran las figuras tan llamativas de otros de sus libros. Y lo hace con un lenguaje claro y preciso. La claridad expositiva es una de las cortesías hacia sus lectores y seguidores, cualidad que se une a su talante amable y solícito ante cualquier requerimiento para participar en foros y conferencias de meteorología y climatología. Se percibe con nitidez, además, tanto en sus escritos como en sus intervenciones públicas, la pasión por lo que hace. Es, sin duda, un profesional de la comunicación de los asuntos vinculados a las ciencias de la atmósfera auténticamente vocacional.

Los extremos climáticos, cada vez más intensos y frecuentes en el

conjunto del planeta, constituyen otro de los focos de atención del libro. ¿Quién no recuerda en España los temporales, diferentes, pero muy extremos, como Filomena o Gloria? Naturalmente, se tratan también las proyecciones climáticas, con las cinco posibles sendas que nos ofrece el Sexto Informe del IPCC, de las cuales solo una, la de la neutralidad de carbono en 2050, nos conduciría a un final de siglo con un aumento térmico limitado a un poco menos de 1,5 °C.

El lector de Nuestro reto climático bebe en buenas fuentes, en conocimiento contrastado, en información veraz, lejos de los excesos catastrofistas, que, al final, conducen a la inacción, cuando es tiempo de actuar urgentemente. ¿O no han declarado las instituciones públicas y otros actores que estamos en emergencia climática? Incluso el conocimiento procede, en algún caso, de la experiencia vivencial del autor; por ejemplo, de su participación en 2018 en la XXXI Campaña Antártica Española y de su estancia en la base científica española de la isla Livingston. Viñas no nos oculta la gravedad del problema y la magnitud del reto de descarbonizar la economía para conseguir que el calentamiento global no supere ciertos umbrales, y aporta las reflexiones necesarias para valorarlo de forma adecuada. Nos dibuja con la máxima nitidez posible, a la luz de las proyecciones climáticas, el horizonte de mediados de siglo y el finisecular. Y, al final, se desprende, sin moralinas hacia el lector, la necesidad urgente de actuar en la buena dirección de la sostenibilidad, del cambio de modelo energético, del fin del derroche y la esquilmación de los recursos; en suma, un profundo cambio de modelo socioeconómico.

No podemos dejar de destacar la singularidad del libro en cuanto a la inclusión de textos breves de muy reconocidos profesionales, investigadores de diferentes ramas científicas y hasta artistas, que enriquecen su contenido, aportan reflexión de alto nivel y contribuyen a lograr una obra redonda en su objetivo de explicar en este tercer decenio del siglo XXI la dimensión de la realidad climática actual y futura.

La apuesta editorial por la publicación de este libro ha sido un acierto, y usted, lector o lectora, tiene en sus manos una apuesta ganadora para comprender de un modo riguroso e inteligible uno de los principales retos, si no el primero, al que nos enfrentamos los

humanos en este siglo XXI. Le auguro una lectura provechosa.

JAVIER MARTÍN VIDE

Catedrático de Geografía Física

de la Universidad de Barcelona

PREFACIO

Hace diecisiete años publiqué mi primer libro, titulado ¿Estamos cambiando el clima? (Equipo Sirius, 2005) y lo dediqué al cambio climático. Ya por aquel entonces era un asunto mediático del que se hablaba bastante, pero se veía todavía como algo lejano, que nos afectaba solo de forma tangencial. La imagen del oso polar en un Ártico que empezaba a hacer aguas se convirtió en icónica, pero el Polo Norte quedaba a miles de kilómetros de casa y, a pesar de las advertencias de los científicos, el ciudadano de a pie no percibía aún el calentamiento global como algo que le pudiera empezar a complicar las cosas y a ponerle piedras en el camino.

Las proyecciones climáticas que circulaban en aquel momento (las del Tercer Informe del IPCC, publicado en 2001) no invitaban precisamente al optimismo, pero imperaba la prudencia y la moderación en el discurso de los investigadores del clima, conscientes de las incertidumbres que todavía en aquel momento se tenían sobre algunas de las cuestiones clave del comportamiento climático. Eso es lo que me llevó a incluir los signos de interrogación en el título de mi ópera prima; no porque tuviera dudas de que el cambio climático tenía un fuerte componente antropogénico, sino para dejar abierta la pequeña posibilidad (desestimada pocos años después) de que nuestra influencia en el clima terrestre no fuera el principal elemento modulador de los cambios observados en él.

En 2022, la visión del cambio climático por parte de la sociedad ha cambiado sustancialmente. Comenzamos a notar su aliento, lo percibimos ya como una amenaza real, cercana, que puede complicarnos mucho la existencia, al margen de todos los demás problemas que se abaten sobre nosotros y que no parecen tener fin. Desde mediados de la década de 1990 (en la que comencé mi andadura profesional), las estanterías de mi despacho se han ido poblando de libros dedicados al cambio climático; un centenar largo

de ellos, reunidos sin afán de coleccionismo por mi parte. En la bibliografía que encontrará al final, bajo el epígrafe «La biblioteca del clima», incluyo una selección de esos títulos, cuya lectura le recomiendo, aunque antes le invito a dedicar unas horas de su tiempo a leer lo que quiero contarle.

El cambio en la percepción que empezamos a tener sobre el cambio climático se ha trasladado también a la manera en que nos referimos a él. La propia forma de denominar al fenómeno ha ido sufriendo una transformación, que es sintomática de la manera en que ha ido evolucionando y manifestándose. En 1975, apareció un artículo publicado en la revista Science titulado «Cambio climático: ¿Estamos al borde de un calentamiento global pronunciado?». Lo firmaba el geofísico Wallace S. Broecker (1931-2019) y, a partir de ese momento, ambas expresiones empezaron a popularizarse gracias a la prensa. Como la principal evidencia del cambio en el clima era el aumento de las temperaturas, se fue imponiendo el «calentamiento global», aunque, posteriormente, a raíz de la fundación del IPCC en 1988, empezó a hablarse cada vez más del «cambio climático».

El impulso definitivo para esa denominación se produjo durante el mandato presidencial de George W. Bush en EE. UU., entre los años 2001 y 2009. Al no ser partidario de la descarbonización sugerida por la comunidad científica, Bush forzó a distintas instituciones internacionales, como Naciones Unidas, a utilizar el término «cambio climático» en sus informes y documentos, en lugar de «calentamiento global» (cuyo principal responsable era por aquel entonces EE. UU., al ser el país que más gases de efecto invernadero emitía a la atmósfera). Quedaba así camuflada la responsabilidad humana del fenómeno, al tratarse de uno más de los cambios climáticos que han sucedido en la Tierra. Este golpe de efecto, a nivel de comunicación, logró diluir un poco el hecho —inequívoco a los ojos de la ciencia— de que el cambio climático actual es, en gran medida, antropogénico y, por tanto, podemos, sobre el papel, frenarlo.

En los últimos años, los impactos cada vez más evidentes y de mayor magnitud del calentamiento global, y su mayor componente social, impulsado por el movimiento estudiantil liderado por Greta

Thunberg, han hecho que pasemos a hablar de la emergencia o crisis climática. Soy más partidario de esta última denominación que de la primera, ya que una emergencia exige que nos mantengamos permanentemente en alerta; algo que no resulta fácil y que termina llevándonos a una relajación que culmina con una desconexión de la realidad. Pienso que es más apropiada la idea de que estamos en una crisis climática a escala global, al margen de otras crisis que nos están tocando vivir en los últimos tiempos, como la provocada por la pandemia de la covid-19, o la que se está gestando aceleradamente mientras escribo estas líneas, como consecuencia de la invasión rusa de Ucrania.

A diferencia de lo que viene siendo habitual en mis escritos, este libro no lo he concebido estrictamente como una obra de divulgación científica, sino como un ensayo, en el que quiero compartir con usted, querido lector, algunas de las cuestiones que considero más relevantes en relación con el calentamiento global, con la vista puesta en su evolución futura y en las consecuencias que ello puede acarrear.

Llevamos tanto tiempo hablando del tema, hay tanto escrito sobre él, que en esta ocasión no invertiré más líneas de las necesarias en explicar conceptos, asumiendo que ya sabe de qué le hablo si me refiero al IPCC, al efecto invernadero o al permafrost, por citar tres de ellos a vuelapluma. He preferido incidir en aspectos claves del asunto, en reflexionar sobre ellos y, también, en compartir reflexiones de distintas personas que han tenido a bien colaborar en el libro.

Con independencia del lugar donde residamos y de la actividad a la que nos dediquemos, todos estamos empezando a vernos afectados, en mayor o menor medida, por el cambio climático (en cualquiera de sus denominaciones) y nuestro porvenir estará condicionado por la manera en que evolucione el clima durante las próximas décadas. Cuando concebí el proyecto editorial pensé que sería una buena idea incluir en él las aportaciones de un nutrido grupo de personas, no solo de mi ámbito profesional, que de alguna manera representaran a nuestra sociedad y ofrecieran distintas visiones sobre nuestro porvenir climático. Intercaladas a lo largo del texto, tendrá ocasión de leer lo que han escrito.

Confío en que el libro le haga reflexionar sobre muchos de los aspectos que, a buen seguro, habrá leído o escuchado con anterioridad. Hay mucho publicado sobre el tema, quizás demasiado, aunque el reto climático al que nos enfrentamos es tan mayúsculo que está justificado que sigan apareciendo libros dedicados al asunto y que se hable, y mucho, de ello. El libro que tiene entre sus manos es el resultado de mi labor divulgadora en el campo de las ciencias atmosféricas durante los últimos veinticinco años. En todo ese tiempo, he tratado de estar bien informado de lo que hemos ido conociendo sobre el complejo comportamiento del clima terrestre, su evolución futura y sus impactos. En ello sigo. Espero que le resulte interesante, entretenida y provechosa la lectura.

I.

EL CAMBIANTE CLIMA TERRESTRE

El clima de la Tierra es cambiante por naturaleza. La historia geológica del planeta ha venido acompañada de una sucesión continua de cambios climáticos de distinto signo y magnitud, siendo bastante más extenso el tiempo en que el clima terrestre ha sido significativamente más cálido que el actual, que lo contrario. Dicha circunstancia pone en un contexto adecuado al cambio climático actual, lo que no debe llevarnos a pensar que el de ahora es solo uno más de la larga lista de cambios climáticos, ya que es el primero de todos ellos que no se puede explicar sin tener en cuenta nuestra influencia en el mismo, lo que marca su principal singularidad.

En este primer capítulo, comentaremos cómo han influido a lo largo de la historia de la Tierra distintos factores naturales en el clima, produciéndose en diferentes momentos grandes cataclismos que provocaron giros bruscos e inesperados en la evolución climática. También es interesante saber cómo son capaces los científicos de conocer detalles del clima terrestre de épocas muy antiguas, que se remontan hasta varios centenares de millones de años atrás. Sin irnos tan lejos, comentaremos también algunos ejemplos que ayudan a entender hasta qué punto somos hijos del clima. La evolución humana no se entiende bien sin tener en cuenta el factor climático. A veces pienso que actúa como el monolito que concibió Arthur C. Clarke (1917-2008) en su famosa saga de novelas de ciencia ficción Una odisea espacial.

EL CALENTAMIENTO GLOBAL PRIMIGENIO

Remontarnos a los orígenes de nuestro planeta es un viaje a un mundo desconocido. Todo lo que podamos contar sobre él es necesariamente especulativo, aunque de una cosa sí que estamos seguros: era un mundo mucho más cálido que el actual. Aunque la Tierra fue enfriándose progresivamente —en un proceso que llega hasta nuestros días—, durante un vasto período de su larga historia la atmósfera tuvo una temperatura mucho mayor que la que tiene ahora; el calentamiento global del presente es una anécdota si lo comparamos con el primigenio, lo que no significa que debamos minusvalorarlo. Aunque los seres humanos tenemos una gran capacidad de adaptación a diferentes ambientes, la rapidez con la que está subiendo la temperatura y los impactos cada vez más evidentes de la celeridad del calentamiento nos está empezando a poner las cosas un poco más difíciles.

Volvamos hacia atrás en el tiempo, al momento en que nació la Tierra como resultado de la acreción de una miríada de objetos rocosos que orbitaban alrededor del Sol y que formaron un protoplaneta, hace unos 4.600 millones de años (Ma), que se dice pronto. No está claro en qué momento exacto se formó la atmósfera primitiva, pero sí que era muy distinta a la actual.

Hasta que no surgió la envoltura gaseosa no se puede empezar a hablar del clima terrestre. Se especula que lo primero que se formó fue un océano de magma. La actividad en aquella Tierra primigenia era frenética. Su tamaño no era aún como el actual, ya que el bombardeo continuo de grandes meteoritos y cometas seguía añadiendo masa al cuerpo inicial. La liberación de calor era tan bestial que parte de esos materiales se fundieron y dieron lugar al citado océano magmático. En el proceso de enfriamiento del mismo se empezaron a liberar gases y se fue formando la atmósfera en varias etapas. Esto se cree que pudo haber comenzado transcurridos varios centenares de millones años después del origen del protoplaneta.

Aquel mundo ardiente, hostil e inerte recibía el violento impacto de multitud de objetos extraterrestres y empezaba a tener una importante y creciente actividad volcánica. Los cataclismos estaban a la orden del día. Su primera atmósfera estaba formada por hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y metano, sin apenas nitrógeno y nada de oxígeno. Con el paso del tiempo fue aumentando la proporción de nitrógeno molecular (N_2), pero el gas que dominaba en la atmósfera hace unos 4.000 Ma era el dióxido de carbono (CO_2). La composición de aquella atmósfera primitiva se parecía mucho a la de las atmósferas de Venus y Marte. El oxígeno molecular (O_2) no comenzó a tener una presencia significativa en la atmósfera hasta hace unos 2.000 Ma, cuando la vida (y los procesos biológicos que acarrea) ya había aparecido en el planeta. Las cianobacterias presentes en los océanos primitivos —gracias a su actividad fotosintética— fueron aportando oxígeno a la atmósfera, hasta alcanzarse una situación de equilibrio, en la que la proporción N_2/O_2 se mantuvo constante (78/21) y así ha seguido hasta nuestros días.

Nos ha llevado muchos años aceptar la existencia del cambio climático, así como los impactos que ello está ocasionando en nuestras vidas, y se ha perdido tiempo en la instauración de las medidas de corrección eficaces y adecuadas. Con la vista puesta en 2050, estoy seguro de que, aunque con un poco de tardanza, la humanidad será capaz de equilibrar una evolución del planeta que presenta graves riesgos para nuestra civilización e incluso para la propia supervivencia.

ÁNGEL RIVERA

Meteorólogo

Es interesante y revelador quedarnos con un dato: durante prácticamente la primera mitad de la larga historia de la Tierra (no menos de dos mil millones de años), la temperatura media

planetaria era mucho más alta que la actual, debido al potente efecto invernadero reinante durante aquel vasto período de tiempo. Ese fue el principal impedimento para que la vida pudiera progresar. Aun así, lo consiguió en el medio oceánico y con formas muy elementales, poco complejas. La sucesión de cambios climáticos, de distinto signo y magnitud, que se produjeron desde entonces (alguno de ellos provocado bruscamente por causas externas, como el impacto de un asteroide de gran tamaño) casi lograron extinguir la vida en cinco ocasiones, pero en ninguna de ellas lo consiguieron del todo; los seres vivos volvieron a resurgir como el ave fénix, colonizando nuevos hábitats y ganando en complejidad. El calentamiento global actual es de mucha menor magnitud que el primigenio, pero si evoluciona por alguna de las sendas que plantean las proyecciones climáticas, comprometerá, sin duda, nuestro actual modo de vida y quizás nuestra supervivencia y la de muchas otras especies que conviven con nosotros.

ALTERNANCIA DE FRÍO Y CALOR

Una vez transcurrida esa larga etapa cálida inicial en la Tierra, el clima comenzó a presentar grandes oscilaciones térmicas, entrando en escena cada cierto tiempo períodos fríos de diferente extensión y magnitud.

A escala geológica hay distintos mecanismos que modulan el clima. Tenemos, por un lado, los ligados a la propia dinámica del planeta, como los cambios en la distribución de los continentes y océanos (dictados por la tectónica de placas), la elevación de las cadenas montañosas (clave en la configuración que adoptan a escala global las corrientes atmosféricas) y la actividad volcánica y, por otro, los factores astronómicos, tanto los cambios a largo plazo en los parámetros orbitales terrestres, como el impacto de asteroides.

Cuando pensamos en un planeta mucho más frío que el actual nos vienen a la cabeza las glaciaciones. Una glaciación es un período particularmente frío en la Tierra, cuya duración puede variar entre cuarenta mil y cien mil años, durante el cual las grandes masas de hielo y nieve no quedan confinadas a las regiones polares, sino que se extienden por latitudes más bajas, cubriendo una porción significativamente mayor de la superficie terrestre. La última ocurrida en la Tierra finalizó hace unos doce mil años, por lo que estamos ahora en un período interglacial, a la espera de que se produzca en el planeta una nueva glaciación. Algunos climatólogos especulan que, si el calentamiento global sigue evolucionando, tal y como apuntan algunas proyecciones climáticas, podría impedir su entrada en escena.

El término «glaciación» se usa con ligereza. Si bien es correcto identificarlo con un período glacial o una edad de hielo —expresión que da nombre a la famosa serie de películas de animación Ice Age —, no es lo mismo que una era glacial, ya que, en este caso, el período de tiempo que abarca es mucho mayor; no unas cuantas decenas de miles de años, sino decenas o centenares de millones de

años.

A lo largo de la historia geológica del planeta se contabilizan siete eras glaciales. Ahora mismo, aunque resulte poco intuitivo, estamos en una de ellas: la séptima. En la Tierra hay casquetes polares (el del hemisferio norte en fase menguante, como la luna), cosa que no siempre ha ocurrido en la larga historia geológica del planeta. De hecho, gana por goleada el tiempo en el que en nuestro planeta no ha habido hielo.

La actividad geodinámica de la Tierra conlleva que los geólogos —y cualquier otro científico interesado en las Ciencias de la Tierra que quiera abordar la evolución de los procesos planetarios a escala global— nos movamos en escalas de tiempo de decenas e incluso cientos de millones de años. Por ello, resulta casi paradójico y osado pretender hacer un pronóstico riguroso de lo que pueda ocurrir en nuestro planeta a una distancia temporal de menos de treinta años en el futuro. No puedo asegurar qué ocurrirá en 2050, pero sí manifestar mi seria preocupación por las actividades que la humanidad está desarrollando en cuanto a nuestra sutil atmósfera y que pueden ser muy negativas para nuestro futuro, para el futuro de nuestros descendientes. Éticamente, creo que debemos intentar que ello no ocurra.

JESÚS MARTÍNEZ FRÍAS

Geólogo. Experto en Meteoritos, Geociencias planetarias y Astrobiología. IGEO (CSIC-UCM).

En este libro hablaremos más de calor que de frío. Es lo que toca. El calentamiento global está empezando a escribir un nuevo capítulo en la larga serie de avatares climáticos que ha vivido la Tierra. Afortunadamente para nuestros intereses, de momento el clima terrestre no es muy diferente al que les tocó vivir a nuestros padres, abuelos y bisabuelos, a pesar de los impactos negativos cada vez

más evidentes que está provocando la subida de la temperatura. Aunque las proyecciones climáticas apuntan a más calor, nada impide, a priori, que entre en escena un factor natural —interno o externo— o una concatenación de ellos y se ponga freno de forma transitoria al calentamiento global. Un ejemplo de ello sería un aumento significativo de la actividad volcánica. Tenemos varios ejemplos bien documentados de grandes erupciones ocurridas a lo largo de la historia.

Cualquier erupción volcánica tiene un impacto en la atmósfera, bien sea a escala local, regional o global. De los aproximadamente mil quinientos volcanes activos que hay en la Tierra, alrededor de medio centenar entran cada año en erupción, aunque afortunadamente solo una vez cada siglo (en promedio y sin reglas fijas) ocurre una erupción lo suficientemente grande para influir de forma notable en el clima terrestre, provocando un importante descenso de la temperatura global y alterando los patrones meteorológicos en extensas franjas terrestres, lo que conlleva consecuencias devastadoras.

El principal efecto que provoca una gran erupción volcánica es un enfriamiento a escala planetaria, no muy duradero, mayor o menor en función de su magnitud; y de la cantidad de aerosoles que incorpore a la atmósfera. En los casos más extremos se suele hablar de inviernos volcánicos, ya que el proceso eruptivo provoca un tiempo invernal en muchas regiones del mundo. La formación de un velo de minúsculos piroclastos y gotitas con una elevada concentración de ácido sulfúrico en la alta atmósfera, alrededor de toda la Tierra, impide que una fracción de la radiación solar incidente alcance la superficie terrestre.

Los inviernos volcánicos no solo dan lugar a la bajada global de la temperatura, también alteran significativamente la dinámica atmosférica e inciden en la biodiversidad. Las grandes erupciones volcánicas ocurridas en distintos momentos de la historia de la humanidad han generado impactos muy negativos, dando lugar, por ejemplo, a grandes hambrunas, debido a su incidencia muy negativa en la agricultura. Seguro que les suenan estos tres nombres: Krakatoa, Tambora y Laki. Quizás algo menos Toba. A estos cuatro volcanes (más concretamente a sus megaerupciones) vamos a

dedicar unas líneas. Creo que merece la pena conocer cómo puede cambiar el clima terrestre de forma repentina, ya que es una posibilidad no contemplada por el IPCC en sus informes, al ser imposible hacer cualquier predicción en ese sentido.

De todas las grandes erupciones volcánicas que tenemos referencias históricas, la del Laki en Islandia, ocurrida entre el verano de 1783 y la primavera de 1784, ocupa el primer puesto por su magnitud y por los impactos que tuvo. En su último libro (Desastres. Cómo las grandes catástrofes moldean nuestra historia, Capitán Swing, 2021), la sismóloga Lucy Jones dedica uno de los capítulos a esa megaerupción, que califica como «el desastre natural más mortífero de la historia de la humanidad». Se estima que seis millones de personas murieron a causa de la larga erupción, principalmente por las terribles hambrunas que desencadenó.

Miles de ellas perecieron al inhalar los gases tóxicos (dióxido de azufre y fluoruro de hidrógeno, entre otros) que vomitó el Laki de sus entrañas. Islandia estuvo a punto de quedar despoblada. Allí murieron algo más de diez mil personas, lo que representa algo más de la quinta parte de la población de la época en la isla. Las cenizas y los gases volcánicos cubrieron durante meses los cielos de gran parte de Europa, volviéndose neblinosos y parduzcos. Dicha circunstancia y las noticias que fueron llegando de Islandia y de otros lugares fueron las que llevaron a postular a Benjamin Franklin —que en aquella época ejercía como diplomático en París— que las erupciones volcánicas influyen en el clima, provocando grandes alteraciones atmosféricas a larga distancia.

En otro pasaje de su libro, Lucy Jones apunta que «los volcanes son el único riesgo natural que puede causar un impacto global por su capacidad para afectar a la composición de la estratosfera», lo que con la erupción del Laki se cumplió con creces. Los volcanes también emiten CO2 y podríamos pensar —equivocadamente— que superan ampliamente a las emisiones procedentes de nuestras actividades, pero salvo que entre en escena una megaerupción, cada año el CO2 volcánico emitido a la atmósfera se mueve en una horquilla (en números redondos) de entre 80 y 300 millones de toneladas, frente a las 40.000 millones de toneladas antropogénicas de 2019.

El siglo XIX cuenta en su haber con dos grandes erupciones volcánicas: la del Tambora y la del Krakatoa, ocurridas en 1815 y 1883 respectivamente. De ambas disponemos de abundante información y conocemos muchos detalles sobre los impactos que provocaron tanto en el ámbito tropical, donde ocurrieron, como en Europa y en otras zonas del planeta. La del Krakatoa fue la primera gran erupción de la historia que tuvo cobertura mediática. Varios periódicos de la época mandaron corresponsales a la zona y sus crónicas permitieron a la población conocer detalles sobre la explosiva erupción. Los libros, escritos por naturalistas o historiadores, dejaban de ser la única fuente de información sobre erupciones volcánicas.

La erupción del Tambora, situado en la isla de Sumbawa, en Indonesia, se considera la mayor erupción volcánica ocurrida en la Tierra en los últimos diez mil años. El proceso eruptivo tuvo lugar entre los días cinco y diez de abril de 1815. La explosividad fue extrema, estimándose que la columna de materiales que generó pudo haber ascendido hasta algo más de 30 km de altitud. Del orden de 150 km^3 de materiales volcánicos se dispersaron por la atmósfera. En el entorno del volcán (decenas de kilómetros a la redonda) la vida fue aniquilada. Murieron por el impacto directo unas doce mil personas. Las distintas explosiones se escucharon hasta a 2.000 km de distancia y llegaron a acumularse varios centímetros de cenizas en lugares situados a 500 km del cráter.

El oscurecimiento debido a la inyección de esas grandes cantidades de materiales a la atmósfera provocó un marcado descenso de la temperatura global en 1816, con importantes anomalías meteorológicas, dando lugar a lo que se bautizó como «el año sin verano». Existe una amplia bibliografía al respecto, en la que se describen los numerosos impactos que provocó esa megaerupción, así como su influencia a todos los niveles en la sociedad de la época. Una de las historias más conocidas es la que relaciona la novela Frankenstein o el moderno Prometeo de Mary Shelley con el inexistente verano del año posterior a la erupción.

La erupción del Krakatoa tampoco se queda muy atrás. En este caso, los materiales lanzados a la atmósfera por el volcán fueron significativamente menores que los que lanzó el Tambora, pero la

violencia del proceso eruptivo fue aún más extraordinaria. Seguramente provocó el sonido más intenso generado en la Tierra desde los orígenes de la humanidad. La montaña donde se localizaba el Krakatoa, también en Indonesia, voló literalmente por los aires entre los días 26 y 27 de agosto de 1883. Se estima que algunos materiales llegaron a alcanzar hasta los 80 km de altitud. Al igual que pasó con el Tambora, la megaerupción provocó un enfriamiento global, aunque de menor magnitud y duración. Durante meses se pudieron ver en muchos lugares del mundo espectaculares crepúsculos, de intensos colores, que quedaron plasmados en numerosos cuadros de paisajes.

Casi con total seguridad, a lo largo del presente siglo se producirá al menos una gran erupción volcánica en la Tierra, que tendrá un fuerte impacto en el clima. El enfriamiento que provoque quebrará la tendencia al alza de las temperaturas, pero será algo temporal, de unos pocos años a lo sumo. Pensando en una erupción volcánica tropical similar a las del Tambora o el Krakatoa, los impactos en una sociedad globalizada e interconectada como la actual son imprevisibles, pero seguramente tendrán una gran magnitud. Aunque tanto esa amenaza como la de cualquier otro gran desastre natural siempre está presente, Lucy Jones fue explícita en una de las entrevistas promocionales de su libro al afirmar que ni siquiera la más potente de esas hecatombes se acerca en peligrosidad al cambio climático.

Termino este repaso a los inviernos volcánicos y a las catástrofes asociadas a las megaerupciones con unos breves apuntes del volcán Toba, situado en el norte de la isla de Sumatra, donde hoy en día se localiza un gran lago con una isla en su parte central. A diferencia de lo que sabemos de las erupciones de los volcanes que hemos comentado, y de otras ocurridas también en épocas históricas más recientes (como la de la isla mediterránea de Santorini, en el siglo XVII a. C., que acabó con la cultura minoica, o la del Vesubio, en la región italiana de Campania, del año 79, que sepultó bajo varios metros de cenizas las localidades de Pompeya, Herculano y Estabia), la megaerupción del Toba se remonta mucho más atrás en el tiempo, hace unos 74.000 años, y lo que sabemos de ella es más especulativo. En lo que sí que se ponen de acuerdo los científicos es que tuvo una magnitud muchísimo mayor que la de las erupciones

que hemos comentado.

En 1998, un investigador de la Universidad de Illinois llamado Stanley H. Ambrose comentó en un artículo que una de las consecuencias de la erupción del Toba fue la desaparición de las poblaciones de Homo sapiens de Asia, que, según su teoría, no fue ocupada por seres humanos hasta hace unos sesenta mil años, debido a nuevos flujos migratorios procedentes de África. Más recientemente, otros investigadores han cuestionado las tesis de Ambrose, ya que gracias al hallazgo de unas herramientas de piedra en el yacimiento de Dhaba, en el norte de la India, se ha podido deducir la presencia allí de algunas comunidades de nuestra especie que lograron sobrevivir a la erupción del volcán. El Toba causó cambios catastróficos en los ecosistemas y una gran alteración climática, pero no acabó por completo con las poblaciones humanas en aquella región de la Tierra.

Tal como hemos visto, la influencia volcánica en el clima es una constante a lo largo de la historia, si bien, en la mayoría de los casos, los períodos fríos a los que dan lugar no son duraderos ni tampoco es posible saber de antemano cuándo se producirán en el futuro. En ocasiones, como veremos en el próximo apartado, la actividad volcánica ha contribuido a calentar el planeta. La alternancia entre el frío y el calor se sucede constantemente en la Tierra a diferentes escalas tanto espaciales como temporales. Durante el Cuaternario —desde hace unos 2,6 millones de años hasta la actualidad— la sucesión de glaciaciones (períodos fríos) y períodos interglaciales es bastante regular, lo que viene dictado por la acción combinada de tres factores astronómicos (parámetros orbitales terrestres), cuyos ciclos estudió hace un siglo el astrónomo y geofísico serbio Milutin Milankovich (1897-1958).

Las glaciaciones duran en promedio unos ochenta mil años, mientras que los períodos interglaciales como el actual (el Holoceno) tienen una duración bastante menor, de entre diez mil y veinte mil años. Los seres humanos llevamos desde nuestros orígenes conviviendo con estos importantes altibajos de temperatura en la Tierra. La entrada en escena de las glaciaciones nos obligó a refugiarnos en cuevas en las regiones frontera de los grandes mantos de hielo que avanzaron desde el norte, mientras

que durante los períodos interglaciares aprovechamos para expandirnos por más lugares de la Tierra, adaptándonos también a las épocas frías y cálidas que van conformando la evolución climática. Ahora nos toca vivir en un mundo cada vez más cálido, al que nos vamos a tener que ir adaptando. En tiempos pretéritos, mucho antes de que diéramos nuestros primeros pasos en África, el calor que caracterizó el clima terrestre durante la mayor parte de su larga historia cambió varias veces de signo, produciéndose algunas superglaciaciones, en las que la vida en el planeta pendió de un hilo.

BOLAS DE NIEVE

Como ya hemos comentado, el clima terrestre fue bastante más cálido que el actual durante la primera mitad de la historia del planeta, gracias a la presencia de una atmósfera primitiva enriquecida de CO_2 y otros gases de efecto invernadero. Posteriormente, los períodos con temperaturas superiores a la actual siguieron dominando más tiempo que los fríos. La génesis de las eras glaciales puede ser debida a tres posibles causas: 1) impacto de un asteroide de gran tamaño, 2) aumento de la actividad volcánica y 3) reducción de la radiación solar incidente cuando la Tierra atraviesa una densa nube de polvo cósmico (hipótesis que plantean algunos astrónomos). Con base en la información paleoclimática disponible (cuya obtención detallaremos en el siguiente apartado) se piensa que la Tierra ha estado al menos en cuatro ocasiones cubierta total o casi totalmente de nieve y hielo. Cada una de estas superglaciaciones se conoce como un episodio de Tierra blanca o Tierra bola de nieve (Snowball Earth) y su irrupción llegó a extinguir casi por completo la vida en el planeta.

Si bien se remontan al siglo XIX los primeros estudios que permitieron deducir la existencia, en tiempos muy remotos, de períodos en los que la extensión de los mantos de hielo superó a la que sabemos que ha ocurrido durante las glaciaciones del Cuaternario, fue en 1998 cuando se postuló formalmente la teoría de la Tierra bola de nieve, a cargo de los investigadores de la Universidad de Harvard (EE. UU.) Paul Hoffmann y Daniel Schrag. Basaron su hipótesis en el descubrimiento de vestigios de hielo en determinados estratos geológicos, correspondientes al final del eón Proterozoico (Precámbrico Superior). Esos restos de hielo primitivo se han hallado por todo el planeta, lo que sugiere que tanto las zonas continentales como las oceánicas de toda la Tierra (incluida la franja ecuatorial) quedaron cubiertas por una gruesa capa de hielo. La temperatura media global pudo llegar a descender hasta los -50 °C. Se han llegado a datar hasta cuatro de esas superglaciaciones a lo largo de un período comprendido entre los

800 y los 550 millones de años antes del presente, durante un período bautizado como Criogénico.

Existen hasta tres modelos distintos de Tierra bola de nieve. Un primer modelo, conocido como «el oasis tropical», plantea una Tierra no congelada en su totalidad, sino con grandes masas de agua oceánica libres de hielo. Hay un segundo modelo, bautizado como «el mar tropical», que únicamente deja sin cobertura de hielo a una estrecha franja de océano en la zona ecuatorial. Finalmente, el tercer modelo es el que más se ajusta a una superglaciación; en él, la superficie terrestre (tanto las áreas continentales como las oceánicas) se congela en su totalidad, quedando solamente agua líquida en las profundidades de los océanos.

El episodio que mejor parece ajustarse a este último modelo teórico de superglaciación fue el ocurrido hace unos 700 millones de años. Tanto en este como en los demás eventos sucedidos en el Precámbrico Superior y en épocas anteriores, se especula que el desencadenante fue una disminución en la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, con el CO2 y el metano a la cabeza. El progresivo enfriamiento terrestre provoca la formación de cantidades cada vez mayores de hielo, cuya presencia reforzó cada vez más dicho enfriamiento, debido al aumento del albedo (más cantidad de energía solar incidente reflejada al espacio).

Un vez que culmina la superglaciación, con presencia de hielo en todas las latitudes terrestres, salvo en los reductos de las aguas tropicales, el camino inverso, hacia la deglaciación, vendría de la mano de la actividad volcánica, que, aparte de aerosoles (que contribuyen a enfriar) emitirían enormes cantidades de CO2 que reforzarían el efecto invernadero, lo que iría elevando la temperatura planetaria. En los próximos años, seguro que asistimos a la publicación de nuevos estudios paleoclimáticos que darán o quitarán peso a la teoría de las superglaciaciones.

CLIMATOLOGÍA FORENSE

Reconstruir el clima del pasado no es sencillo, pero hemos ido desarrollando toda una batería de técnicas sofisticadas que nos permiten hacerlo con relativo éxito. Hay que tener claro que cuanto más hacia atrás viajemos en el tiempo, mayor será la incertidumbre y menor el nivel de detalle que podamos alcanzar. No está a nuestro alcance saber si un año, década o siglo en particular fue lluvioso en la península ibérica hace cincuenta millones de años, por poner un ejemplo a vuela pluma. Ese nivel de precisión sí que podemos alcanzarlo durante la época instrumental (cuyo inicio podemos situar en 1850) y, también, en algunos casos (no siempre) durante los siglos anteriores, en los que se dispone de documentación histórica.

Si queremos conocer cómo se comportó el clima hace cien años lo tenemos relativamente fácil y podemos afinar bastante. Por aquel entonces ya disponíamos de una red global de observatorios y estaciones meteorológicas que cubría toda la superficie terrestre, aunque su densidad era bastante menor que la actual y con marcadas diferencias entre unas regiones y otras (aspecto que sigue ocurriendo en la actualidad). Todavía no se disponía de satélites meteorológicos, se empezaban a lanzar globos sonda a la atmósfera, pero no se habían implementado aún los radiosondeos, y en los mares y océanos, que cubren el 71 % de la superficie terrestre, algunos barcos medían variables meteorológicas en sus travesías, pero las rutas marítimas estaban mucho menos transitadas y eran menos que en la actualidad. Además, todavía no se usaban boyas con una función meteorológica. A pesar de las limitaciones, la información disponible es suficiente para caracterizar el comportamiento atmosférico de hace un siglo y, así, poder saber cómo era el clima reinante en los locos años veinte.

Remontándonos un poco más atrás en la historia, con anterioridad al siglo XIX no se dispone de registros meteorológicos instrumentales suficientes (ninguno antes del siglo XVII) que

permitan caracterizar bien el clima. Dicha circunstancia nos obliga a recurrir a fuentes documentales, como los libros de actas capitulares, los archivos eclesiásticos o los cuadernos de bitácora de los antiguos navíos, que son la base de estudio de la climatología histórica. Si queremos viajar al pasado miles, decenas de miles, centenares de miles o millones de años, la única fuente de información disponible son los llamados datos proxy, que de manera indirecta permiten efectuar reconstrucciones paleoclimáticas. Se obtienen de fuentes de lo más diversas y lugares insospechados; analizando sedimentos marinos o lacustres, a través del estudio isotópico de los testigos de hielo que se extraen de Groenlandia y la Antártida, de estalagmitas en cuevas, estudiando los pólenes fosilizados, los anillos de crecimiento de los árboles, los corales, fósiles de microorganismos marinos…, la lista es muy larga.

Hay miles de científicos de todo el mundo estudiando estas cosas y arrojando luz sobre los climas del pasado. Es importante saber cómo fue el comportamiento climático cuando la influencia antrópica era inexistente o testimonial, ya que todo lo que deduzcamos que ocurrió fue por causas ajenas a nosotros. Echando la vista atrás, se puede llegar a entender cómo reaccionó el sistema climático ante un determinado forzamiento y eso es justamente lo que hacen todos esos detectives del clima, buscando para ello información hasta de debajo de las piedras. Las reconstrucciones paleoclimáticas pueden ser comparadas con la evolución actual del clima y con lo que indican las proyecciones climáticas para este siglo, en cada uno de los escenarios que, como veremos más adelante, plantea el IPCC en su último informe.

El clima depende del ciclo del agua, de las masas boscosas, del estado de los océanos, de la construcción de infraestructuras y alteración del paisaje, de la contaminación más allá de los gases de efecto invernadero, de la biodiversidad que encontramos en los distintos ecosistemas. Como en un andamio que apoya en múltiples patas, debemos fortalecerlas todas para asegurar la integridad y la resiliencia de la estructura. Ojalá en 2050 no estemos haciendo equilibrismos para no caernos, sino asegurando anclajes para poder restaurar y construir de nuevo.

ANDREU ESCRIVÀ

Ambientólogo, doctor en Biodiversidad y divulgador del cambio climático

Explicar los entresijos de las distintas técnicas de datación paleoclimática excede el cometido de este libro, pero sí que merece la pena hacer una pequeña incursión en el fascinante mundo de la climatología forense, que es el nombre que se me ha ocurrido para describir el campo de estudio de los detectives del clima del pasado: los paleoclimatólogos. Algunos de ellos se han especializado en el análisis de los testigos de hielo. ¿Cómo se pueden reconstruir los cambios climáticos del pasado a partir de ellos? Estos testigos son cilindros de hielo de unos veinte centímetros de diámetro, que mediante un sistema de perforación son extraídos de los gruesos mantos de hielo que hay tanto en Groenlandia como en la Antártida. Se han llegado a extraer cilindros de casi 4.000 metros de largo, que han permitido reconstruir el clima durante los últimos dos millones de años. Lógicamente, según se van extrayendo se trocean en secciones que oscilan entre 1 y 6 metros y que permiten, así, su almacenamiento.

Esos grandes mantos helados son el resultado de la acumulación de las sucesivas nevadas que, a lo largo de millones de años, se han ido produciendo en esas regiones polares. Las capas de nieve se van compactando por su propio peso y forman un hielo tanto más duro cuanto más profundo esté. En ese proceso quedan atrapadas burbujas de aire cuya composición isotópica varía en función de las condiciones ambientales que hubo en cada época. Se analiza la proporción de determinados isótopos estables, como el ^{2}H (conocido como deuterio) o el ^{18}O. Una vez extraídos los testigos se hace una datación de los mismos y en la lámina o sección que interese se estudia la composición isotópica; en particular, cómo es la relación de esos isótopos con los átomos más livianos, ya que las proporciones varían en función de la temperatura del aire en el momento en el que tuvo lugar la nevada que atrapó ese aire primitivo.

El análisis de los isótopos mediante técnicas de espectroscopía de masas permite llevar a cabo la datación paleoclimática, de manera que se puede saber si, por ejemplo, hace, digamos, ochenta mil años hubo un período extraordinariamente frío o lo contrario, una época caracterizada por su templanza. El clima deja su huella en el aire primitivo atrapado en el hielo. La labor de los paleoclimatólogos es detectivesca, pero obtiene como recompensa el conocimiento de las variaciones climáticas en un pasado remoto. El interés por saber lo que ocurrió hace mucho tiempo en el clima de la Tierra no solo obedece a la curiosidad innata de los seres humanos; en este caso, ofrece claves que pueden ayudarnos a entender los posibles cambios venideros.

No hace mucho, en un testigo de hielo de Groenlandia se detectaron niveles de yodo (un elemento químico con capacidad de destruir ozono) anómalamente altos, que pudieron relacionarse con diferentes cambios climáticos acontecidos en el Ártico en los últimos 127.000 años. El análisis del yodo y otros halógenos contenidos en el manto helado groenlandés ha revelado también que el océano es el gran regulador del yodo en la atmósfera del Ártico. Además, la variación de este elemento químico en el aire gélido de esa región no solo está relacionada con la productividad biológica del océano sino también con la dinámica de las banquisas de hielo en las zonas polares. Con la vista puesta en la evolución futura del clima en esa región tan vulnerable al calentamiento global, es interesante monitorizar la concentración de yodo en el aire, a modo de centinela, como el canario de la mina.

Los testigos de hielo, tal y como hemos apuntado, pueden proporcionarnos, en el mejor de los casos, una reconstrucción paleoclimática de los últimos dos millones de años (en algunos se han llegado a obtener proxies de un millón de años más atrás), por lo que, para datar cambios climáticos más antiguos (de hace decenas o centenares de millones de años), hay que recurrir a otras técnicas como el estudio de los foraminíferos, y con ellos terminaré esta pequeña incursión por la climatología forense.

Se trata de unos minúsculos organismos unicelulares (la mayoría de apenas unos pocos milímetros de diámetro) que se localizan principalmente en el medio marino y cuya principal característica

morfológica es que tienen concha. Este elemento calcáreo fosiliza con facilidad y ese hecho convierte a los foraminíferos en una herramienta muy útil para estudiar los climas del pasado. Sus minúsculas conchas se localizan en casi todas las rocas y los sedimentos marinos.

Estos organismos conquistaron los mares y océanos desde principios del Paleozoico —hace unos 570 millones de años— y en función de las características que presenten sus microfósiles no solo puede datarse la edad de los materiales rocosos que forman el sedimento, sino muchos otros detalles que tenía el ambiente donde vivió el minúsculo organismo, como la temperatura del agua, su salinidad, la profundidad donde tenía su hábitat, la paleolatitud… Con toda esta información se pueden conocer aspectos importantes sobre el clima del pasado y caracterizar los cambios climáticos que se produjeron en distintos momentos de la historia de nuestro planeta. Insisto en la idea que ya comenté con anterioridad: este conocimiento (paleoclimático) es fundamental para aprender cómo puede evolucionar el clima en el futuro, al margen de la forma en que nosotros lo estamos modulando.

HIJOS DEL CLIMA

Desde nuestros orígenes, los seres humanos hemos tenido que adaptarnos a la naturaleza cambiante del clima, lo que ha ido marcando nuestra propia evolución. De todo esto se ha escrito bastante y se aborda con detalle en algunos de los libros que incluyo en la bibliografía. Le recomiendo especialmente la lectura de El cambio climático en la historia de la humanidad, de Benjamin Lieberman y Elizabeth Gordon (Almuzara, 2021), ya que las reflexiones que van haciendo los autores son, en mi opinión, muy acertadas. El tema de la influencia del clima en la evolución humana y el desarrollo de nuestra civilización puede abordarse desde dos enfoques distintos: el que plantea que es el clima (a través de su variabilidad multiescalar) el que en todo momento va marcando nuestro camino evolutivo, y una segunda línea de pensamiento que lo considera un factor importante, pero no el único que explica los distintos avatares de nuestra historia.

Por lo que se sabe, parece claro que la aparición de los homínidos en África hace entre seis y siete millones de años se vio favorecida por unas condiciones climáticas propicias para ello. Un clima cada vez menos húmedo, aunque todavía más cálido que el actual, fue reduciendo las densas y extensas selvas que ocupaban aquella vasta región terrestre, apareciendo la sabana, lo que fue clave del surgimiento del bipedismo, ante la necesidad de nuestros primeros ancestros de buscarse la vida a ras de suelo. Todavía tuvieron que transcurrir algo más de dos millones de años para que apareciera allí, en tierras africanas, el Australopithecus, un primate homínido más avanzado, y otro millón de años más (hace unos 2,8 millones de años, según la datación de los restos fósiles más antiguos localizados hasta la fecha) del género Homo, en una fase climática que desde bastante tiempo atrás apuntaba a un enfriamiento, en el que empezaron a producirse las pulsaciones frío-calor (glaciaciones-períodos interglaciales) que hasta el momento actual caracterizan al Cuaternario.

Nos ha tocado convivir en todo momento con esas oscilaciones climáticas y en esas seguimos, si bien ahora, por primera vez en nuestra ya larga historia, estamos asistiendo a un calentamiento global en gran medida provocado por nuestras actividades, algo que no ha ocurrido nunca con anterioridad. El florecimiento de la civilización egipcia, la expansión y el declive del Imperio romano, el colapso de los mayas o las dificultades (y también resiliencia) impuestas por la Pequeña Edad del Hielo son circunstancias que podemos analizar en clave climática, pero en los distintos avatares que tuvo el clima, en esos y otros muchos momentos de nuestro paso por el planeta, no hubo intervención humana o, si la hubo (con el surgimiento y la expansión de la agricultura, por ejemplo), no parece que fuera un factor relevante frente a otros como los astronómicos o las grandes erupciones volcánicas.

Se cuentan por centenares los estudios que tratan de relacionar cambios climáticos del pasado con el colapso y el florecimiento de distintas culturas y civilizaciones. Por poner un ejemplo, el declive y la desaparición de una antigua civilización que se asentó en el Valle del Indo, hace más de 6 000 años, que alcanzó su esplendor entre los años 2 600 y 1 900 a. C en la Edad de Bronce, y desapareció hacia el 1 300 a. C, se ha podido explicar (gracias al análisis de datos paleoclimáticos obtenidos de las estalagmitas de unas cuevas situadas al sur de Asia) por un cambio importante en el patrón del comportamiento del monzón. Las alteraciones del ciclo anual de las lluvias monzónicas son críticas en las regiones de la Tierra afectadas por ellas, ya que la actividad agrícola depende en gran medida de la disponibilidad de agua. Hoy en día se estudian los cambios que el calentamiento global puede inducir en la dinámica atmosférica, en particular en el régimen monzónico de lluvias, ya que afecta a una de las regiones más pobladas de la Tierra.

MIRADA AL FUTURO DESDE LA PREHISTORIA

Durante más de una década he tenido la inmensa fortuna de ejercer como guía-intérprete en varias cuevas con arte rupestre prehistórico del Cañón del Río Vero (Huesca), declaradas Patrimonio Mundial

por la UNESCO. Desde el primer día he sentido una enorme responsabilidad y curiosidad por lo que representan, su significado y su finalidad. No puedo dejar de pensar en sus creadores, con sus costumbres, su lengua, su música, sus historias y, por supuesto, en aquella naturaleza en la que vivían y de la que obtenían todo lo necesario.

Hoy he caminado dos horas hasta el abrigo de Chimiachas, donde existe un bellísimo ciervo de estilo levantino pintado por un pueblo cazador y recolector, tal vez diez mil años atrás. Me siento frente a él y mi mente comienza a imaginar aquellos bosques infinitos habitados por lobos y osos, glaciares coronando las cumbres pirenaicas, ríos embravecidos tras las lluvias primaverales… Las estaciones se sucedían y así lo vivieron y celebraron generación tras generación, durante siglos y milenios. Las vidas de aquellos pueblos fluían al ritmo de la naturaleza. Pero ellos, sin saberlo, eran descendientes de unos grupos humanos que, en siglos anteriores, vieron y sufrieron las consecuencias de un cambio climático global y que marcó el final de la última glaciación cuaternaria.

No puedo dejar de mirar a los ojos del ciervo y su poderosa cornamenta. Siento que recobra vida, me mira y me quiere decir algo. Desde este rincón apartado de la Sierra de Guara, ha sido testigo del paso de los tiempos. Todo lo que hoy conocemos y somos, así como nuestra Historia, ha sucedido después de aquel instante en que una mano trazó minuciosamente el cuerpo del animal, con plumas y pinceles que extendían el rojo intenso del óxido de hierro. Todo estaba por crear, inventar, descubrir y suceder.

Continúo frente a frente con aquel mundo ancestral y salvaje al que un día pertenecimos. Nosotros, que cazábamos y pintábamos ciervos, ya pertenecemos al siglo XXI. Hemos alcanzado un nivel de desarrollo científico y tecnológico jamás imaginado, hemos superado todas las barreras del conocimiento, hemos pisado la Luna, nos hemos enfrentado a una pandemia mundial en tiempo récord… Sin embargo, y por primera vez en la Historia de la Humanidad, nos enfrentamos a una realidad inédita y desconocida a la que llamamos emergencia climática, provocada y acentuada por nuestra propia actividad, nivel de desarrollo y hábitos de vida.

El gran ciervo, nacido de la tierra más salvaje, me sigue mirando. Y mientras esto sucede, me pregunto cuál será el futuro de todos nosotros y del planeta tal como lo conocemos, no dentro de mil años, sino en 2050. ¿Seremos capaces de tomar conciencia de especie y redirigir el rumbo de nuestras acciones para evitar el colapso? ¿Aprenderemos a reencontrarnos con nuestro verdadero hogar que es la naturaleza? Estamos a tiempo de lograrlo y lo tenemos que lograr. No hay otro camino.

NACHO PARDINILLA

Geógrafo y educador ambiental

La influencia en las sociedades humanas de la actividad volcánica también ha sido motivo de estudio. A escala local, a todos nos viene a la cabeza, por ejemplo, la imagen de Pompeya literalmente engullida por las cenizas y el flujo piroclástico que generó el Vesubio en el año 79, pero a lo largo de la historia ha habido erupciones cuyos impactos han tenido un mayor alcance. Estando ya embarcado en la redacción de este libro, en el otoño de 2021 se publicó un trabajo en el que unos investigadores correlacionaron el colapso de algunas dinastías chinas con megaerupciones ocurridas en los últimos dos milenios.

A partir del análisis de testigos de hielo de Groenlandia y la Antártida se pudieron datar 156 de esas grandes erupciones entre el año 1 y 1915. El impacto que tuvieron algunas de ellas en la agricultura en China provocó grandes hambrunas y conflictos sociales que propiciaron el final de algunas dinastías, aunque un análisis más fino permite afirmar que el factor volcánico no fue el único que intervino. Lo que es innegable es que una gran erupción volcánica es capaz de introducir en la alta atmósfera (principalmente a la estratosfera) enormes cantidades de dióxido de azufre, lo que provoca un enfriamiento a escala global y alteraciones en los patrones meteorológicos que terminan teniendo consecuencias en nuestra civilización.

Existe también mucha literatura científica sobre las posibles causas de la supremacía de los sapiens sobre los neandertales y el resto de especies del género Homo. Las glaciaciones siempre han supuesto una dura prueba para la supervivencia humana. Se ha podido comprobar que algunos congéneres nuestros, como el Homo erectus y el heidelbergensis, empezaron a tener problemas de adaptación a las glaciaciones y, aunque se fueron dirigiendo a zonas más cálidas, la rapidez y magnitud que tuvo el enfriamiento global en una de algunas de esas pulsaciones frías, los llevó al colapso y su extinción. El Homo neanderthalensis no solo se tuvo que enfrentar al frío, también tuvo que competir con el Homo sapiens, que fue el que, al final, ganó la partida y logró sobrevivir. Aquí seguimos, aunque ahora los problemas de adaptación vendrán, previsiblemente, de la mano del calor.

La acción del hombre y sus impactos en la naturaleza (y en el sistema climático) hizo que, hace unos años, parte de la comunidad científica empezara a hablar del Antropoceno para referirse a una nueva época de la historia geológica de la Tierra, caracterizada por ese impacto global de las actividades humanas. No hay consenso sobre el momento en que se inició ese nuevo período. Para algunos autores coincide con el final de la última glaciación, para otros con los albores de la agricultura; los hay que fijan ese inicio en fechas mucho más recientes, como el inicio de la Revolución Industrial, momento a partir del cual la concentración de CO2 en la atmósfera comenzó a dispararse.

UN HÁLITO DE ESPERANZA

Ahora mismo considero que poco, o nada, tiene menos futuro que el futuro mismo. Como somos la única especie que puede imaginar lo que sucederá, con esa frase intento explicar que será a nosotros, los humanos, a quienes más afecte la falta de afecto hacia lo que respiramos y nos hace posibles. Herida como está la transparencia y, sobre todo, desactivada la capacidad de anticiparse al desastre, creo que dentro de treinta años esta civilización habrá retrocedido varios siglos en lo que al progreso convencional se refiere. No es lo peor. Habrá ardido la mitad de los bosques. Quedará menos del

30 % de la multiplicidad de lo viviente. Será casi imposible alimentar a los supervivientes. Solo me consuela que no veré desaparecer los casi 30.000 árboles que habré plantado antes de ser yo también cenizas.

Con todo, también tengo un sueño.

Cómo un reducido porcentaje de la humanidad sabe no ensuciarlo todo. Cómo unos pocos preferimos considerarnos criaturas del mismo clima. Cómo podemos cultivar, viajar, construir sin un bulímico gasto de energía muy por encima de lo necesario. Como, al fin, se comprendió que nada resulta más importante que respirar, los Gobiernos decidieron imitar a esos pocos gobernados que seguían inhalando transparencia y enviaron a todos los humos a la cárcel. A tiempo.

JOAQUÍN ARAÚJO

Naturalista y escritor

A falta de que el establecimiento del Antropoceno sea o no aprobado por la comisión internacional pertinente, en términos geológicos la última época del actual período Cuaternario es el Holoceno. Sí que parece estar justificado el nombramiento del Antropoceno, ya que la magnitud de los impactos que los seres humanos hemos ido haciendo en el planeta es muy importante y perceptible. Entre las cosas que hemos ido provocando está la reducción de la capa de ozono, la contaminación química, el cambio climático actual, la acidificación de los océanos, la producción masiva de plásticos o los cambios de usos de suelo.

Quedémonos con una idea como colofón de este primer capítulo: las sociedades humanas son vulnerables a los cambios climáticos, algo que en la actualidad vuelve a ponerse de manifiesto con el asunto del calentamiento global. Aunque históricamente el clima no ha sido la única causa que ha provocado el declive o la desaparición de una determinada cultura, imperio o civilización, siempre ha sido

uno de los factores clave del asunto, si no el principal.

II.

LA SINGULARIDAD DEL CAMBIO CLIMÁTICO ACTUAL

Tal y como hemos ido relatando en el capítulo anterior, cuando se echa la vista atrás y, a partir de registros paleoclimáticos, se intentan caracterizar otros cambios climáticos ocurridos en el pasado, las escalas temporales en las que se producen no son de siglos, sino de milenios, con la dificultad añadida de que, según nos vamos alejando hacia atrás en el tiempo, vamos perdiendo precisión. Las técnicas disponibles, a pesar del grado de sofisticación que han alcanzado, no nos permiten saber, ni de lejos, si, por ejemplo, la primavera del año 2.000.000 a. C. fue seca o lluviosa en el Mediterráneo. A pesar de las limitaciones al conocimiento, no debemos resignarnos y tirar la toalla.

Sabemos, por ejemplo, que al final del Paleoceno (hace 56 millones de años) se dispararon también las concentraciones de CO2 en la atmósfera. La diferencia entre aquel cambio climático y el actual es, tal como acabo de apuntar, el de las escalas temporales, ya que la subida del dióxido de carbono atmosférico que se experimenta en la actualidad se inició coincidiendo con la Revolución Industrial, por lo que se ha producido en unos 250 años (aunque es un proceso inconcluso, todavía en marcha), mientras que el máximo térmico que tuvo lugar entre el Paleoceno y el Eoceno se prolongó por espacio de 200.000 años. La temperatura global aumentó del orden de los 6 ˚C y aquello tuvo importantes consecuencias en los seres vivos. Se extinguieron muchas especies, otras evolucionaron (como algunos mamíferos que disminuyeron de tamaño) y la población de insectos aumentó.

En este segundo capítulo hablaremos mucho del CO2; no en vano es el principal modulador del calentamiento global, al que dedicaremos también varias páginas. La magnitud que ha ido alcanzando comienza a manifestarse en forma de numerosos

impactos que nos ponen las cosas cada vez un poco más difíciles. En este sentido, las conclusiones expuestas este mismo año en la parte del Grupo de Trabajo II del Sexto Informe del IPCC (AR6 por sus siglas en inglés), dedicado a la vulnerabilidad, la adaptación y los impactos del cambio climático, son demoledoras. Estamos instalados en la zona roja; la de las anomalías cálidas cuasipermanentes, y eso nos obliga a convivir con unos fenómenos meteorológicos extremos que van a más y para los que no queda otra que intentar adaptarnos y, paralelamente, poner en marcha con urgencia medidas de mitigación.

RAPIDEZ Y VULNERABILIDAD

En las conferencias que desde hace años me demandan con cierta regularidad sobre el cambio climático, insisto siempre en la idea de la singularidad que tiene el actual con respecto a los ocurridos en el pasado. Su rapidez es una de sus señas de identidad y, para ilustrarlo, en las presentaciones que siempre utilizo en mis charlas, incluyo un gif animado de un guepardo, para que de un vistazo a los asistentes les quede claro la celeridad del proceso. La subida de un grado (en números redondos) que ha experimentado la temperatura media global en el último siglo ha requerido de mucho más tiempo en los cambios climáticos ocurridos en el pasado. Si en 2100 la subida fuera de 3 °C (escenario de emisiones intermedio), con la vista puesta atrás no encontramos un cambio de esa magnitud en escala de siglos, sino de milenios, con la única excepción de algunos cambios climáticos abruptos.

La magnitud de la subida que está experimentando la temperatura no es igual en todo el planeta. El Ártico, del que hablaremos con detalle en el siguiente capítulo, es la región del mundo donde está siendo más acusada, lo que ya tiene efectos muy perceptibles en el paisaje, así como grandes impactos en la fauna y la flora. La pérdida de hielo que está teniendo lugar allí sorprende cada año más a los científicos, aunque el acelerado deshielo es extensible a la mayor parte de la Tierra. Un dato: entre 1994 y 2017 se han perdido veintiocho mil millones de toneladas de hielo. Expresémoslo en kilos y con cifras: 28.000.000.000.000. Para visualizar cuánto hielo es eso, diremos que equivale a una capa de cien metros de espesor que cubriera en su totalidad todo el Reino Unido. Hay muchísimo más hielo en el mundo —la mayoría localizado en la Antártida y Groenlandia—, pero es una pérdida significativa y, además, se detecta un aumento en el ritmo del deshielo, habiendo aumentado la tasa en un 65 % desde mediados de los años 90. Es particularmente acusada (con una mayor aceleración) en los mantos de hielo de ese par de regiones polares, cuyo comportamiento es clave en la evolución futura del clima.

ALGÚN LUGAR DE LA MANCHA, 2050

Siempre he querido pasar mi jubilación alejada de la ciudad y tener un huerto donde poder cultivar mi alimento. Mi pueblo en Extremadura era un grandísimo candidato para este fin, pero deseché la idea allá por 2020: el ritmo al que avanzaba el cambio climático iba a hacer muy difícil poder vivir en esa zona tal como me gustaría.

Mi pueblo nunca había sido un lugar excesivamente frío y húmedo. De hecho, recuerdo pasar calor en verano cuando era pequeña, pero no el calor insoportable de la década de 2020. En aquella época cada vez eran más habituales los días con temperaturas superiores a los 40 °C en verano, así como las noches en las que «salir al fresco» era sacar la silla a más de 30 °C. Además, empezábamos a convivir con épocas secas cada vez más frecuentes, con cortes de agua… Si eso era así en aquel momento y viendo las medidas insuficientes para mitigar el cambio climático a nivel mundial, mi pueblo no iba a ser mi idílico lugar de retiro en el futuro. Así fue como decidí apostar por un lugar relativamente elevado de La Mancha, donde el clima actual me recuerda al de mi querido pueblo cuando era pequeña, cuando jugaba en la calle casi a cualquier hora del día, necesitaba chaquetilla por las noches y acompañaba a mi abuelo a recoger los tomates que le daba el suelo de su huerto.

ISABEL MORENO

Física y comunicadora meteorológica

Otro hecho que hay que tener en cuenta es que las temperaturas diurnas no están subiendo al mismo ritmo que las nocturnas. En un estudio en el que se analizaron los datos globales de temperatura entre 1983 y 2017 se detectó una diferencia en la temperatura media anual de más de 0,25 °C entre el calentamiento diurno y el

nocturno en más de la mitad de la superficie terrestre. Hay sitios de la Tierra donde el calentamiento de día es más rápido que el que se produce de noche, pero para el conjunto del planeta el ritmo al que sube la temperatura es significativamente mayor de noche que de día. La principal causa responsable de esta asimetría es la cobertura nubosa, ya que el calentamiento global está provocando que haya más nubes, pero mientras que de día contribuyen —a escala global — a enfriar la superficie terrestre, de noche ocurre lo contrario y se potencia el calentamiento nocturno. El que las noches, en general, sean más cálidas provoca a su vez un aumento de la humedad del aire. La sensación de agobio durante las noches de verano es un hecho que cada vez está notando más, querido lector, lo que dificulta el sueño, aparte de provocar otra serie de trastornos en nuestra salud.

LA SALUD EN CLAVE CLIMÁTICA

La interacción entre salud humana y cambio climático es compleja y diversa: los cambios en la temperatura tienen como consecuencia variaciones en la incidencia, prevalencia y el índice de mortalidad de determinadas enfermedades; los eventos meteorológicos extremos tienen consecuencias catastróficas inmediatas y a largo plazo; la contaminación y polución atmosférica en macrociudades inciden sobre la salud de millones de habitantes; junto con el aumento de enfermedades transmisibles por alimentos y agua contaminados se produce un incremento de las transmitidas por vectores infecciosos: los mosquitos, con unas 3.500 especies en todo el mundo, son los principales inoculadores de virus como el zika o el dengue, gusanos como las filarias, o protozoos como el parásito de la malaria.

Somos casi 8.000 millones de personas en el mundo, lo que implica 42.000 millones de toneladas de CO_2 equivalentes anuales emitidas a la atmósfera. El deshielo del permafrost ártico ha traído al escenario, ya complicado, nuevas amenazas: la emisión de metano, con exacerbación del calentamiento global y la potencial liberación de bacterias resistentes a los antibióticos o virus no descubiertos, que han permanecido millones de años en su interior y representan

un riesgo serio para la salud global.

A este ritmo, sobrepasaremos con creces el umbral crítico de calentamiento global. La temperatura terrestre está aumentando con más rapidez de lo previsto y, como resultado, también se acelera la modificación de las áreas de distribución de la fauna, de los virus y, cada vez más, de las personas. Apenas comenzamos a entender qué vínculos unen las epidemias con la variación en las condiciones meteorológicas, pero sabemos que el cambio climático acelera la propagación de las enfermedades y dificulta la predicción de los brotes. La pandemia por covid-19 actual puede ser una evidencia de estos cambios.

The Lancet, revista médica de referencia mundial, concluye en un reciente artículo que el cambio climático es «la mayor amenaza del siglo XXI». Apoyarnos en los científicos, aumentar las inversiones para sus investigaciones, cuidar y replantearnos nuestra relación con la naturaleza, ya, ahora, nos ha de dar una oportunidad para mejorar nuestro futuro. Marquemos líneas de actuación en este sentido, sin tregua, a los políticos que nos representan. Nuestros hijos y nietos lo necesitan, debemos dejarles en herencia irrenunciable un mundo mejor.

PALOMA GONZÁLEZ GARCÍA

JUAN MANUEL GARCÍA SORIANO

Médicos del Servicio Aragonés de Salud

El principal problema que provoca un alto ritmo de subida (o de bajada) de la temperatura es la adaptación, al margen de los impactos que dicha circunstancia va generando. A todo ello dedica una de sus tres partes el Sexto Informe del IPCC, concretamente la preparada por el Grupo de Trabajo II, publicada este mismo año. El documento expresa sin medias tintas cómo el cambio climático se ha transformado en una amenaza cada vez más grave, más palpable, para nuestro bienestar y el del medio natural. Si no actuamos con urgencia, iremos teniendo dificultades crecientes para adaptarnos al

escenario climático que está por venir. Para evitar una mayor pérdida de vidas, de biodiversidad e infraestructuras es necesario tomar medidas urgentes y ambiciosas de adaptación, reduciendo de forma rápida las emisiones de gases de efecto invernadero.

Según el IPCC, los avances en materia de adaptación son dispares, existiendo una profunda brecha entre lo que se está haciendo y lo que se necesita hacer, particularmente en las sociedades de menores recursos económicos y entre la población más desfavorecida. Por otro lado, cada vez hay más evidencias de medidas de adaptación que han causado un efecto contrario al deseado. Por ejemplo, la construcción de una gran presa puede verse como una buena medida de adaptación, pero conlleva la destrucción de parte del medio natural, puede suponer un riesgo para la vida de personas que viven aguas abajo, y su creación aporta grandes cantidades de gases de efecto invernadero.

Una de las cosas que hay que aceptar, lo que a mí me gusta llamar las reglas del juego, es que los seres humanos sufrimos periódicamente los impactos de los desastres naturales, tales como terremotos, inundaciones catastróficas, erupciones volcánicas, sequías o incendios forestales, entre otros. Siempre ha sido así, aunque el número, la magnitud y su coste económico se ha disparado enormemente en las últimas décadas, en gran medida por la manera en que hemos crecido como civilización, ocupando cada vez más zonas vulnerables y susceptibles de padecer las dramáticas consecuencias de las catástrofes. Esa manera atropellada y anárquica de ocupar el territorio y desafiar a la naturaleza no es la única causa que explica el mayor número de desastres naturales (muchos de ellos hidrometeorológicos) en la actualidad que en el pasado.

NATURALEZA, CALIDAD DE VIDA Y FUTURO SOSTENIBLE

Los mayores peligros para mantener funciones imprescindibles que aporta la biodiversidad en la vida del planeta (calidad del aire, del agua, alimentos…) son el aumento de temperatura, las especies invasoras, la contaminación de origen diverso, la modificación del

hábitat y la sobreexplotación de recursos. En concreto, el exceso de CO_2 emitido a la atmósfera, entre otros gases de efecto invernadero, ha generado serias alteraciones, provocando un calentamiento global. Esto nos está haciendo muy vulnerables frente a fenómenos meteorológicos, en ocasiones muy virulentos, que afectan —en especial— a las comunidades costeras.

Cambios ambientales que modifican ciclos biológicos de ciertos organismos propician la multiplicación de otros, cambian la interacción entre ellos y alteran las de organismos con sus entornos. La manera en que se presentan, por ejemplo, las enfermedades infecciosas emergentes, muchas de ellas desconocidas y en alto porcentaje (75 %) de origen zoonótico, se ve afectada por estos cambios. Microorganismos que intrigan y preocupan a los científicos y a la sociedad, cuya rápida transmisión puede atribuirse a aspectos de la vida actual (constantes desplazamientos, conexiones, densidad de población, comercio…), pero evidentemente a notorios cambios ambientales, pérdida de biodiversidad, degradación de hábitats, así como una creciente y, en ocasiones, incorrecta forma de contacto con la vida silvestre.

Por tanto, repensemos de forma integral (atmósfera, océanos, tierras…) las actuaciones humanas sobre el medio ambiente, que tanta repercusión tienen en aspectos que atañen a la vida de todos y todas. Así, evitaremos perturbaciones que inciden en el clima de un planeta donde vive una población que necesita de buenos servicios suministrados desde un medio en equilibrio, y poder prosperar en calidad y de forma sostenible, en definitiva, para que tengamos… ¿futuro allá por 2050?

MARÍA FÁTIMA HERNÁNDEZ MARTÍN

Directora del Museo de Ciencias Naturales de Tenerife

El crecimiento de la población es uno de los factores que está provocando que hoy en día haya más desastres que nos afecten de lleno que antiguamente. No solo somos muchas más personas en el

mundo (7.935 millones en el momento en que escribo estas líneas), sino que tendemos cada vez más a concentrarnos en grandes ciudades (a mediados del presente siglo, dos de cada tres individuos vivirán en una ciudad), muchas de las cuales se localizan en lugares de elevada vulnerabilidad. Otro factor que hay que tener en cuenta es el hecho de que vivimos en una sociedad conectada digitalmente y hoy en día no hay desastre natural que se escape a las redes de comunicación. Nos enteramos de todo lo que pasa en el mundo al instante. Si hoy en día se producen al año del orden de trescientos desastres naturales de gran magnitud, nos llega (aunque sea en formato flash) información de todos ellos, algo que antiguamente no era así, pues apenas trascendían las noticias de los desastres que ocurrían en lugares lejanos.

Por lo que acabamos de comentar, podríamos pensar que el aumento en el número de desastres naturales es de alguna forma ficticio y no obedece a una causa natural. Esto —por las razones esgrimidas— es en parte verdad, pero solo en parte, ya que el cambio climático está contribuyendo a aumentar los desastres de tipo hidrometeorológico, que son, con diferencia, los más numerosos y costosos. Su evolución nos está obligando a adoptar de forma rápida medidas de adaptación, mitigación y resiliencia, destinadas a reducir sus impactos. A pesar de los progresos —innegables— que se han ido produciendo, queda todavía un largo camino por recorrer, que pasa por tener un mejor conocimiento de dónde invertir los mayores recursos y cómo actuar en el marco actual de emergencia climática.

Volviendo de nuevo al Sexto Informe del IPCC, podemos leer en él que la mitad de la población mundial es, actualmente, muy vulnerable a los impactos del calentamiento global, con una subida de temperatura de 1,2 °C. Si se mantiene el ritmo de subida actual, alcanzaremos el famoso grado y medio (+1,5) a finales de la presente década o principios de la siguiente, incrementándose notablemente los impactos, algunos de los cuales serán irreversibles. Ese escenario implicará riesgos graves para nuestra sociedad. El AR6 destaca que el aumento de las olas de calor, sequías e inundaciones de forma simultánea está provocando impactos en cascada que nos desbordan cada vez más. Todo ello afecta de manera desproporcionada, tanto a las poblaciones humanas como a

los ecosistemas más vulnerables.

En las ciudades, donde se concentra gran parte de la población mundial, los impactos del calentamiento global son de mayor magnitud, debido al efecto «isla de calor» y a la contaminación atmosférica. El informe también recalca que los impactos a medio y largo plazo (a partir del año 2040) serán mucho más importantes de lo que estamos observando ahora. Estos últimos —añade— son cada vez más complejos y difíciles de gestionar. Además, se indica que los impactos del calentamiento global no solo tienen que ver con el aumento de las temperaturas y los fenómenos meteorológicos extremos, sino también con las condiciones socioeconómicas, influyendo en el modelo de crecimiento.

Como experto en aerostación, contemplo todos los días los cielos desde el aire y estoy pendiente de la actualidad meteorológica; cada vez hay más catástrofes naturales. Siempre las ha habido, pero no con tanta virulencia. Recuerdo de niño que el invierno era muy duro; ahora apenas hay estaciones, pasamos del verano al invierno de un día para otro. Tenemos expertos trabajando intensamente en todo lo referente al cambio climático. Ya va siendo hora de escuchar y trabajar para curar el planeta.

ÓSCAR AYALA

Piloto de globo

En este mundo que se está calentando con rapidez estamos asistiendo a un cambio en los patrones meteorológicos, cuyas consecuencias encajan bastante bien en los escenarios de cambio climático que tenemos encima de la mesa. En mi opinión, hay dos hechos particularmente llamativos. Por un lado, lo alterada que está la circulación atmosférica en latitudes medias, con numerosas incursiones de aire subtropical hacia el norte, intercaladas con entradas de aire frío muy relevantes que se descuelgan bastante

hacia el sur, dando lugar tanto a profundas vaguadas como a danas, que inestabilizan mucho la atmósfera. Este tipo de situaciones empiezan a ser más frecuentes y están dando lugar episodios de precipitación extrema, de alto impacto, cuyas consecuencias —a menudo catastróficas— se ven agravadas por la existencia de construcciones e infraestructuras en lugares donde nunca se tenían que haberse instalado, como zonas inundables. Parece claro que la energía, en forma de calor, que está almacenando la atmósfera se libera cada vez de forma más violenta, con el resultado que estamos viendo. Si la temperatura del planeta sigue subiendo, estos episodios hidrometeorológicos catastróficos irán a más. Tendremos que convivir y adaptarnos lo mejor posible a ellos.

El mundo tecnológico que hemos ido construyendo a nuestro alrededor nos lleva a pensar que podemos con todo lo que nos echen, que podremos afrontar con éxito cualquier problema que se nos presente, y el cambio climático es uno de ellos; uno más. Sin embargo, los datos deberían de ir quitándonos esa idea de la cabeza. Según el IPCC, entre 3.300 y 3.600 millones de personas viven en lugares con una alta vulnerabilidad al cambio climático, con numerosos desafíos superpuestos: la pobreza, el acceso limitado a servicios básicos (agua, salud…) o los escasos recursos económicos, entre otros.

Los puntos críticos mundiales de alta vulnerabilidad humana se localizan en África Occidental, Central y Oriental, el sur de Asia, América Central y del Sur, los pequeños Estados insulares en desarrollo y el Ártico. En esas regiones del mundo, entre 2010 y 2020 la mortalidad humana por fenómenos hidrometeorológicos extremos fue quince veces mayor que en las regiones con muy baja vulnerabilidad. El AR6 también indica que en los últimos ocho años se han acumulado evidencias que apuntan a un aumento de la vulnerabilidad de las personas frente al calentamiento global, como consecuencia de la degradación y la destrucción de los ecosistemas. No tenemos un planeta B. Si no nos esforzamos por preservar el actual, todo se irá poniendo cada vez más cuesta arriba.

CUESTIÓN DE CONFIANZA

A medida que ha ido aumentando nuestro conocimiento del sistema climático se ha reducido la incertidumbre en relación con el cambio observado y con nuestra influencia en el mismo. Aunque en los medios de comunicación son comunes las afirmaciones categóricas del tipo «el nivel del mar ha aumentado (o aumentará) X centímetros», en los Informes del IPCC cualquier afirmación lleva asociada un nivel de confianza o un término de probabilidad. Es importante conocer el significado de la terminología empleada en el AR6, ya que solo así entenderemos lo mucho o poco que sabemos de cualquiera de las cuestiones abordadas.

En lo que respecta al nivel de confianza, se emplean cinco términos: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. En cuanto a los términos de probabilidad, el abanico es más amplio y va desde un hecho prácticamente seguro (99-100 %) hasta uno excepcionalmente improbable (0-1 %). Entre estos dos extremos tenemos las siguientes opciones intermedias: extremadamente probable (95-100 %), muy probable (90-100 %), probable (66-100 %), más probable que improbable (>50-100 %), tan probable como improbable (33-66 %), improbable (0-33 %), muy improbable (0-10 %) y extremadamente improbable (0-5 %).

Por ejemplo, en el AR6 leemos que es «prácticamente seguro que la capa superior del océano global (0-700 m) se ha calentado desde la década de 1970 y es muy probable que la influencia humana sea el principal impulsor». En lo que respecta al calentamiento del aire, «el “rango probable” de aumento total de la temperatura de la superficie a escala global causado por el hombre entre 1850-1900 y 2010-2019 es de 0,8 °C a 1,3 °C, con 1,07 °C como mejor estimación». Y respecto a las precipitaciones, cuyo comportamiento (marcado por la irregularidad) es más complejo que el de la temperatura, el Sexto Informe nos dice que «es probable que la precipitación sobre el conjunto de las áreas continentales haya aumentado desde 1950, con una tasa de aumento más rápida desde

la década de 1980 (nivel de confianza medio)».

En las cumbres del clima no solo se debaten cuestiones técnicas en base a los niveles de confianza expresados por el IPCC en sus informes; también está en juego la confianza en nosotros mismos, en la sociedad actual, para afrontar el reto climático con determinación. En este caso, la incertidumbre es muy alta, ya que llevamos tres décadas intentándolo y los avances han sido mínimos para lo que tendríamos que haber intentado hacer. Existe un amplio consenso en que tenemos que actuar y hacerlo con urgencia, pero simultáneamente todas las personas somos prisioneras de un sistema que nos mantiene atados, con poco margen de maniobra.

¿SIRVEN PARA ALGO LAS CUMBRES DEL CLIMA?

Mi primera Conferencia de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP) fue la de Lima, en diciembre de 2014. Por casualidades de la vida, me encontré desayunando en la mesa de al lado con Ségolène Royal, la jefa de la delegación francesa. La segunda a la que asistí tuvo lugar al año siguiente en la capital gala, durante la que se alcanzó el famoso Acuerdo de París, que a fecha de hoy todavía sigue sin concretarse en algunos puntos.

Luego vino la de la Marrakech, que me hizo vivir una situación insólita: en un momento dado estaba paseando por un parterre con el entonces comisario europeo encargado de estas cuestiones, el español Miguel Arias Cañete, que me iba contando los últimos avatares de la negociación, cuando, de pronto, nos encontramos con el jefe de la delegación de China y se pusieron a hablar sobre la penúltima propuesta; al cabo de dos minutos se sumó el brasileño y luego el máximo responsable de EE. UU.. Fueron como diez minutos de conversaciones y, al final, lograron cerrar un principio de pacto sobre unos puntos que estaban dando muchos problemas. Luego había que someterlo a las restantes partes, porque en las COP los acuerdos se toman por consenso, algo casi imposible. Y todo ello sucedió en un pasillo, conmigo de testigo mudo.

Después vino la de Bonn en 2017. Al año siguiente tocó en Polonia,

en Katowice. Mi última COP, por el momento, ha sido la de Madrid en 2019, que se montó deprisa y corriendo, porque Chile no pudo organizarla. Muchos me preguntan si las COP sirven para algo. Respondo que sí, aunque pueda parecer lo contrario. Es verdad que aquello es una Torre de Babel en la que se mezclan delegaciones oficiales, ONG, expertos en el clima, científicos, periodistas. En resumidas cuentas, un totum revolutum del que a veces salen pactos importantes, aunque tarden en cumplirse.

CÉSAR LUMBRERAS

Periodista. Director de Agropopular, en la cadena COPE

Ante esta disyuntiva, las citadas cumbres del clima son, de momento, la única fórmula que hemos inventado para tratar de impulsar la acción climática. Empieza a haber un movimiento social que está promoviendo, por ejemplo, las asambleas ciudadanas. Una parte de la comunidad científica (activistas de Scientist Rebellion), consciente de los peligros que se ciernen sobre el futuro de la humanidad, trata de acelerar —a la desesperada— la toma de decisiones políticas y el cambio rápido del modo de vida, pero todavía está lejos de representar a la colectividad. Algunas acciones llevadas a cabo comienzan a ser ruidosas (visibles en los medios), pero hay que esperar más tiempo para ver cuál es su verdadero alcance, y si se puede o no confiar en ellas como impulsor definitivo de la inacción frente al inexorable cambio climático.

CO2 HASTA EN LA SOPA (CALIENTE)

Como bien sabe y habrá leído y escuchado en repetidas ocasiones, en la medida en que ha ido aumentando la concentración de CO2 en la atmósfera, lo ha ido haciendo también la temperatura. La diferencia entre lo que está pasando ahora y lo ocurrido en otras épocas cálidas del pasado —como el resto de períodos cálidos interglaciales u otros de mayor duración ocurridos con anterioridad — es el ritmo de aumento de ese gas de efecto invernadero y su elevada concentración. Una combinación así no se encuentra en los registros paleoclimáticos. Sí que tenemos la certeza de que ha habido concentraciones mayores de CO2 (mucho mayores en algunos casos) en la atmósfera de la Tierra, pero lo que no tiene precedentes conocidos es un subidón de dióxido de carbono tan grande en tan poco tiempo. La manera en la que hemos construido nuestra sociedad moderna es lo que explica esa singularidad.

El vapor de agua es el gas que más contribuye al efecto invernadero en la Tierra, ¿por qué entonces se habla tanto del CO2 y del control de sus emisiones para frenar el calentamiento global? ¿No deberíamos actuar sobre el citado vapor de agua? Este gas es, en efecto, muy eficaz reteniendo calor y el más abundante de todos los gases de efecto invernadero que hay en la atmósfera, pero pensando a escala global, es imposible ejercer un control directo sobre él. Son los gases invernadero no condensables o de larga permanencia en la atmósfera (con el CO2 a la cabeza) los que están reteniendo calor y provocando el calentamiento global. Sobre ellos sí que podemos actuar, cerrando el grifo de sus emisiones a la atmósfera.

El vapor de agua lo que hace es responder rápidamente a los cambios de temperatura (la subida en este caso), ya que cambian las tasas de evaporación y condensación, lo que influye en los procesos que dan lugar a la formación de nubes y a la precipitación. Todo está interrelacionado. Si no frenamos las emisiones de CO2 a la atmósfera, la temperatura seguirá subiendo, se evaporará más agua de la superficie de los océanos y el vapor adicional

incorporado a la atmósfera potenciará más el efecto invernadero y lo hará de forma rápida. Si logramos ir reduciendo los niveles atmosféricos de dióxido de carbono, el aire se cargará menos de vapor de agua, lo que ayudará a disminuir el efecto invernadero y a que el calentamiento global no alcance una magnitud que complique nuestra adaptación.

El CO2 atmosférico tiene un origen tanto natural como debido a la quema de combustibles fósiles, ricos en carbono (tales como el petróleo, el carbón mineral o el gas natural), la quema de biomasa, así como los cambios del uso del suelo y algunas actividades industriales. Es el principal gas de efecto invernadero de origen antrópico, cuya concentración en la atmósfera ha ido aumentando de forma muy destacada desde mediados del siglo pasado, en paralelo a como lo han hecho las emisiones generadas por nuestras actividades.

Se deben detener por completo las emisiones de efecto invernadero porque, simplemente, ya es tarde. Se habla de intentar llegar al objetivo de tener cero emisiones, pero a estas alturas deberíamos estar pensando ya en cómo comenzar a retirar CO2 de la atmósfera, en cómo tener «emisiones negativas».

FERNANDO BALLESTEROS

Astrónomo. Observatorio Astronómico de la Universidad de Valencia

Los científicos vienen observando un aumento en la concentración anual del CO2 atmosférico desde que a finales de la década de 1950 el químico estadounidense Charles D. Keeling (1928-2005) inició una serie de medidas continuas del citado gas de efecto invernadero en el observatorio de Mauna Loa, en Hawái. Allí se consiguen obtener medidas sin distorsiones, que representan fielmente el comportamiento del CO2 a nivel global. A medida que fueron

transcurriendo los años, la curva de Keeling fue mostrando una pendiente hacia arriba, inquebrantable hasta la fecha. Con independencia del año que seleccionemos de la serie, el diente de sierra que marca el máximo anual en cuestión es mayor que el del año anterior y menor que el del posterior.

Cuando en 1958 Keeling completó el primer año de medidas, la concentración de CO2 alcanzó las 315 partes por millón (ppm) en volumen. En 2013, se alcanzaron por primera vez las 400 ppm. Se rompía una barrera psicológica y se reforzaba la singularidad que representa algo así, desconocido con anterioridad por los seres humanos. Desde entonces, el CO2 ha seguido escalando posiciones, con dientes de sierra cada vez más altos. Mientras escribo estas líneas, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha alcanzado las 420 ppm. En ningún momento de la historia de la humanidad hemos tenido en el medio atmosférico una cantidad mayor de CO2.

La medición de su concentración presente en la atmósfera es un tema complejo, no exento de dificultades. Hay distintas técnicas para hacerlo. Lo más común es que se utilice un analizador NDIR, basado en el principio de la absorción de radiación infrarroja. El aparato, básicamente, contiene una fuente y un detector de esa radiación que atraviesa una muestra de aire del ambiente. En función de cuánto CO2 haya en esa muestra, se obtiene en el receptor una medida de voltaje u otra. El problema es que la cantidad de ese gas es ínfima (las 420 partes por millón en volumen que citábamos antes) y, además, en el aire hay otros gases traza, también invernadero, como el vapor de agua, lo que complica las medidas. Para garantizar su fiabilidad, se llevan a cabo calibraciones automáticas y continuas, en muestras de aire que contienen cantidades conocidas de CO2. La metodología es laboriosa, pero actuando así se consigue medir la concentración de ese gas con gran precisión.

Hay varias decenas de observatorios en el mundo en los que se miden las concentraciones de los distintos gases de efecto invernadero y aerosoles. Los que proporcionan medidas del dióxido de carbono están situados en lugares alejados de los grandes focos de emisiones antropogénicas, como el citado de Hawái, o los

situados en la Antártida o Canarias (el observatorio de Izaña, en la isla de Tenerife).

Quizás se haya preguntado en alguna ocasión cómo pueden estar tan seguros los científicos de que el exceso de CO_2 en la atmósfera tiene nuestra huella y no lo están originando las fuentes naturales que en todo momento aportan al aire ese gas invernadero. Lo cierto es que se conocen bien cuáles son esas fuentes y los sumideros de carbono en la Tierra, y está bien cuantificada la cantidad total de CO_2 que emitimos los seres humanos a la atmósfera cada año, como consecuencia del consumo de combustibles fósiles. En 2021, fueron 36.400 millones de toneladas y, en 2022, vamos camino de superar con holgura dicha marca, gracias en gran medida a la guerra en Ucrania, que está trastocando las políticas energéticas de muchos países.

Desde este 2022 aún podemos vislumbrar un atisbo de esperanza. Dentro de tres décadas, los jóvenes que ahora están estudiando en los institutos y las universidades serán los líderes de nuestro planeta. Confiemos en que lo hagan mucho mejor que nuestra generación. Ojalá sus llamadas constantes a reducir la contaminación y la emisión de gases de efecto invernadero —esos mensajes que ahora aparecen en tantas pancartas y proliferan en las redes sociales— se conviertan en leyes de obligado cumplimiento para todos los países. Aunque en 2050 unas cuantas personas puedan estar viviendo fuera de esta cuna, esperemos haber aprendido que es imprescindible cuidar la Tierra… porque no existe un «planeta B» para la humanidad.

CARLOS BRIONES

Bioquímico. Investigador del Centro de Astrobiología (CSIC-INTA) y divulgador científico

¿Podría existir una fuente natural desconocida que pudiera

justificar los niveles observados de CO2 en la atmósfera? El análisis isotópico permite diluir esa duda, ya que el carbono presenta en la naturaleza dos isótopos estables: el carbono 12 y el 13. El átomo de carbono 12 es más ligero que el 13, ya que su núcleo contiene un neutrón menos. Este hecho hace que sea justamente ese el que asimilan más las plantas al crecer. Los combustibles fósiles y la biomasa que quemamos para producir energía enriquecen el aire de ese carbono 12, de manera que la relación entre el carbono 13 y 12 decrece. Los estudios paleoclimáticos determinan que no hay precedentes al menos en los últimos diez milenios de una relación más baja, por lo que la huella humana está presente en ese excedente de CO2 atmosférico.

Han pasado 64 años desde el primer diente de sierra de la curva de Keeling y, en esos algo más de seis decenios, no hemos pisado el freno en ningún momento. Si algún año la tasa de aumento fue algo menor, ha sido por causas ajenas a nosotros, ya que ni en 2020, con el confinamiento debido a la primera ola de la pandemia de la covid-19, logramos reducir de forma significativa nuestras emisiones de CO2 a la atmósfera. Hemos perdido un tiempo precioso para empezar el proceso de frenado. Al no haberlo hecho aún, nos queda como alternativa recurrir al freno de emergencia.Ya no basta con empezar a reducir nuestras emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera de forma tímida y gradual; tenemos que hacerlo rápido y con una desmedida ambición. Cero emisiones (netas) a mediados de siglo. Este es el objetivo de la Unión Europea. ¿Es posible llevarlo a la práctica? Y pensando en que lo fuera, ¿desaceleraría el calentamiento global?

Sobre el papel, sí que podemos transformar profundamente nuestra sociedad de aquí a treinta años, pero no es realista pensar que se puede hacer manteniendo un modo de vida similar al actual (hábitos de consumo, movilidad, globalización…). Nuestra obligación es intentarlo, pero son muchas las piedras en el camino y la actual guerra en Ucrania es una muy grande que ha surgido de la noche a la mañana. No está claro si nuestra sociedad sabrá evolucionar de manera profundamente distinta a como lo ha venido haciendo hasta ahora, incluso aunque su propia supervivencia se vea amenazada y seamos conscientes de ello.

PIEDRAS EN EL CAMINO

En el año 2050, la Tierra no será como el planeta Arrakis. No vagaremos por las dunas de un desierto omnipresente ni viviremos en un mundo subterráneo, pero seguramente la vida será un poco más difícil. En el mejor de los escenarios, en el caso de que hayamos puesto en marcha medidas radicales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, por un tiempo la atmósfera será menos amable y más dura para nosotros y para la biodiversidad del planeta, habrá pequeños cambios en nuestras vidas que a las nuevas generaciones les parecerán aceptables y a los que nos habremos adaptado. En el peor de los escenarios, si el aumento de la temperatura se dispara, el calor o la calidad de la atmósfera no serán en sí mismos el mayor de nuestros problemas, sino las consecuencias socioeconómicas que tendrán estos cambios, en forma de crisis alimentarias y de conflictos por los recursos.

En el año 2050 la Tierra seguirá siendo el planeta azul, no un planeta de ciencia ficción devastado hasta los cimientos por la acción humana, pero en muchos lugares la vida se habrá vuelto mucho más difícil, casi un milagro. Tal vez para entonces hayamos ideado una estrategia para mitigar nuestro impacto o la propia naturaleza haya frenado nuestra cabalgada suicida, no me atrevo a predecirlo. Quizá nos hayamos lanzado a cambiar el color del cielo para «refrescar» el planeta o a fertilizar los océanos para potenciar su capacidad de actuar como sumidero de carbono. Quién sabe. Lo que es seguro es que para entonces ya habremos actuado con mucho retraso; habrán desaparecido muchas más especies y los humanos estaremos un poco más solos en nuestro planeta. Y, si llegamos vivos, los más viejos recordaremos con rabia y nostalgia los tiempos en que tal vez no hicimos lo suficiente para haberlo evitado.

ANTONIO MARTÍNEZ RON

Periodista científico y escritor

Pensemos que logramos afrontar con éxito y eficacia la reducción requerida de emisiones, en los plazos marcados. ¿Empezaríamos a ver primero una estabilización y posteriormente un descenso en las concentraciones de CO2 en la atmósfera? Si hacemos caso a las proyecciones climáticas, en el mejor de los escenarios (para nuestros intereses) que plantea el IPCC en su Sexto Informe (el llamado SSP1-1.9), eso empezaría a ser una realidad al poco tiempo de iniciar la profunda transformación energética, económica y social. No obstante, las inercias del sistema climático están ahí, actuando a la sombra, y todavía no sabemos lo suficiente sobre ellas. La única certeza es que llevamos demasiado tiempo sin pisar el freno y ya solo nos queda recurrir al de emergencia y cruzar los dedos confiando en que funcione.

La absorción de CO2 por parte de los océanos es, a priori, una de nuestras tablas de salvación. De no producirse, la subida global de la temperatura (del aire) sería mucho mayor que la experimentada hasta ahora. Los océanos están acumulando grandes cantidades de calor, robándoselo a la parte baja de la atmósfera, pero su inercia térmica es mucho mayor que la del aire, lo que impide una respuesta «inmediata» en la temperatura del agua. La capacidad calorífica de los océanos es tan enorme que solo los primeros dos metros y medio de su parte superficial contienen tanto calor acumulado como toda la atmósfera. Se estima que desde los años 80 hasta la actualidad, el 93 % del calor extra que han aportado nuestras emisiones de gases de efecto invernadero ha quedado camuflado (absorbido) por el medio oceánico, por lo que el calentamiento global observado es solo debido al 7 % restante. El agua caliente de la superficie requiere de varios siglos para alcanzar el océano profundo, si bien en ese largo viaje, parte del calor volverá a escapar a la atmósfera.

Tanto el calentamiento como la acidificación que están empezando a experimentar las aguas oceánicas, lejos de ser una solución (contribuyendo a descarbonizar la atmósfera), a más largo plazo terminará reforzando el calentamiento global, aparte de ir provocando otros impactos en la compleja máquina del clima y en la vida marina, que ya empiezan a percibirse. Hasta hace poco se

manejaban unas estimaciones que planteaban que una cuarta parte de las emisiones de carbono procedente de las actividades humanas eran absorbidas por los océanos, pero más recientemente se ha estimado que esa absorción asciende a un tercio del total. Ya sabíamos que las aguas de los océanos se están volviendo más ácidas, pero la magnitud con la que está produciéndose este cambio es mayor de lo que se pensaba.

En términos de CO2, aproximadamente la mitad de las emisiones permanecen en la atmósfera, mientras que la otra mitad es absorbida tanto por los océanos como por la vegetación terrestre. El cambio climático, en la actualidad, está empezando a alterar significativamente algunos de los procesos que tienen lugar en la frontera atmósfera-océano. Por ejemplo, si cambian en algunas regiones terrestres los regímenes de viento (intensidad, estacionalidad, rumbos dominantes…), lo terminarán haciendo las corrientes oceánicas y estas, a su vez, provocarán cambios en otros importantes procesos que tienen lugar en el sistema climático.

Si antes me he referido a la tabla de salvación de los océanos —con las limitaciones y precisiones apuntadas—, tenemos en los bosques otra de esas tablas salvadoras, pero no son la panacea. Su condición de fijadores de CO2 invita a mirarlos como aliados, pensando en la adopción de medidas de mitigación del cambio climático. De manera simple podemos pensar que, si plantamos árboles, muchos árboles, habremos dado un gran paso hacia adelante para salvar los muebles y esquivar los escenarios climáticos más peligrosos, pero la cosa no es tan sencilla. En la tercera parte del Sexto Informe del IPCC (la del Grupo de Trabajo III) se indica que la reforestación por sí sola no basta para compensar el exceso de carbono que estamos emitiendo a la atmósfera. Tenemos que hacer muchas más cosas, empezando por una transformación profunda de nuestro modelo de sociedad.

Además, el calentamiento global está afectando a los bosques y a su capacidad de retener CO2. Los árboles, a medida que crecen, lo van absorbiendo y el carbono queda almacenado en la madera. Si sube en exceso la temperatura en un bosque, los árboles se calientan demasiado y se secan, llegando a cerrarse los poros de sus hojas como medida de autoprotección para ahorrar agua, ya que se

reduce la evapotranspiración. El problema es que eso también les impide absorber más carbono, crecer, y cuando mueren los árboles liberan a la atmósfera todo el carbono que han ido almacenando. Pensando en que solo los bosques tropicales contienen alrededor del 40 % del carbono que almacenan todas las plantas terrestres, el hecho de que allí sea cada vez más frecuente tener episodios de altas temperaturas (por encima del umbral de 32 °C) no es algo que invite al optimismo, al margen de la voraz deforestación que tiene lugar en esos pulmones de nuestro planeta.

Por si eso no fuera poco, el aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera es inversamente proporcional al tiempo de residencia del carbono en los bosques. En los últimos 30 años la fijación de carbono por parte de la vegetación se redujo del orden de un 9 %. Este hecho se achaca tanto al inexorable aumento de la temperatura (antes comentado) como al impacto de las sequías. La conclusión es clara: los sumideros de carbono se van a ver limitados, probablemente, por un descenso en la capacidad de retención de los bosques. Tendremos que desplegar una batería de acciones de mitigación que compensen esa limitación creciente de la masa forestal para fijar CO_2.

INSTALADOS EN LA ZONA ROJA

La principal singularidad del calentamiento que está experimentando la Tierra, aparte de ser antropogénico, es su rapidez, lo que supone una dura prueba de adaptación en el caso de que las temperaturas sigan repuntando al ritmo actual o mayor. Desde 1850, que es el año que se elige como inicio de la época instrumental (momento a partir del cual disponemos en la Tierra de un conjunto de observaciones meteorológicas lo suficientemente numerosas para obtener un valor termométrico representativo del conjunto del planeta), la temperatura global ha subido 1,2 ˚C, lo que, a primera vista, puede parecer poca cosa, pero es un ascenso muy significativo si tenemos en cuenta que se ha producido en menos de dos siglos y que, además, una parte importante de esa subida ha ocurrido en las últimas cuatro décadas.

Los efectos del calentamiento global son evidentes. Su magnitud es mayor en algunas regiones terrestres como el Ártico, donde la subida es del orden de 3 ˚C, quedando por debajo de la media la franja ecuatorial. El aire de la baja troposfera no es el único medio que se está calentando, también lo está haciendo el agua superficial de los océanos, llegando la señal del calentamiento en algunas zonas oceánicas profundas. Ya no solo hablamos de olas de calor en la atmósfera (cada vez más frecuentes e intensas), sino también de olas de calor marinas, como veremos en el próximo capítulo. En este marco climático, cada décima de grado que siga subiendo la temperatura incrementará en gran medida los impactos, afectándonos cada vez más de lleno. Nos acercamos a peligrosos puntos de no retorno que debemos evitar a toda costa, dejando de quemar masivamente combustibles fósiles. No queda otra.

Aunque los científicos llevan avisando desde los años 70 del siglo pasado (incluso algo antes, si tenemos en cuenta algunos informes que ya circulaban por EE. UU. en los años 50 y 60) de la acelerada subida de la temperatura que experimentaría la Tierra si seguíamos aportando CO2 a la atmósfera, el calentamiento global ha tardado

mucho más tiempo en calar en la población. La ola de calor que tuvimos en Europa en el verano de 2003 marcó un antes y un después en la percepción colectiva del peligro que supone para la salud pública tener temperaturas altas extremas. Aquel prolongado episodio de calor nos ayudó a entender el alto precio en vidas que conllevan las olas de calor, cuyo aumento en frecuencia e intensidad es un hecho incuestionable, asociado al cambio climático actual.

El recordado verano de 2003 estuvo marcado por una intensa ola de calor que, con pequeñas fluctuaciones, se mantuvo durante tres semanas seguidas, superando tanto en duración como en intensidad a cualquier otro episodio de calor documentado en los siglos XIX y XX. Se alcanzaron o superaron en centenares de observatorios y estaciones meteorológicas temperaturas máximas del orden de los 40 ˚C. Solo en España cayeron del orden de los 300 récords de temperatura en los distintos observatorios, si bien desde entonces no han faltado olas de calor extraordinarias, destacando la del verano de 2015, con 26 días de duración. Lo que sí que marcó un hito en el verano de 2003 fue el número de personas fallecidas a causa del calor, que ascendió —en números redondos— a 70.000 en toda Europa.

Cuando a raíz de aquella ola de calor tan mortífera se especuló con la posibilidad de que esos episodios de altas temperaturas aumentarían de frecuencia e intensidad, como consecuencia del cambio climático, muchas personas mostraron incredulidad ante tal vaticinio, ya que no parecía razonable que algo tan extraordinario como aquella ola de calor extremo pudiera convertirse en la norma en lugar de la excepción. Diecinueve años después, el nuevo escenario climático ya no deja lugar a dudas. Las olas de calor son cada vez más frecuentes, ya no solo tienen lugar en los meses centrales del verano, alcanzan una mayor magnitud y nos afectan cada vez más de lleno, con el consiguiente impacto en la población.

Las olas de calor, lo mismo que las de frío, no son algo nuevo, pero sí que resulta llamativo el protagonismo creciente que están experimentando las primeras frente a las segundas, lo que parece encajar en el escenario de calentamiento global en el que estamos inmersos. El IPCC en su Tercer Informe (AR3 — año 2001) ya

anticipó cuál iba a ser esta nueva realidad climática. En una de las figuras que más difusión tuvo del citado Informe se mostraba lo que ocurre en una distribución normal de temperaturas (campana de Gauss), en la que los extremos marcan los valores más bajos (cola izquierda de la campana) y más altos (cola derecha) que pueden alcanzarse en un determinado observatorio, si aumenta a la vez la temperatura media (desplazamiento hacia la derecha de toda la campana) y la varianza (rango en el que registran temperaturas).

El calentamiento global está modificando la campana de Gauss inicial, aplastándola y desplazándola hacia la derecha. Al ser ahora mayor el rango de temperaturas altas o muy altas, empieza a ser cada vez más habitual que esos valores extremos no solo se den en los meses de verano, sino que se den también en primavera y en otoño. Tal y como apuntamos con anterioridad, los episodios de calor son cada vez más frecuentes que los de frío y, además, se están alcanzando en ellos unas temperaturas cada vez más extremas, batiéndose récords en cascada.

EL CLIMA Y LAS ESTACIONES

A nivel profano, de ciudadano de a pie, conozco y me preocupan los cambios climáticos de estos últimos años, en que hemos ido contemplando y padeciendo cómo se diluyen las estaciones que fueron representadas, magistralmente, en la pintura, por los impresionistas desde finales del XIX y que en la música, con Vivaldi a la cabeza, nos dejaron en su obra un maravilloso retrato musical; yo he vivido esas estaciones en donde el cromatismo, producido por los cambios de temperatura, diferenciaban, cada tres meses, los pasos cromáticos del nacimiento primaveral, la vida estival, el envejecimiento otoñal y la muerte invernal. Hoy apenas sí se distinguen. Es como si la naturaleza se revelase contra nosotros, por eso me preocupa la evolución de los próximos años.

Se ha alterado la estabilidad social y con ella la de la naturaleza: huracanes, terremotos, volcanes en erupción, incendios de tercer grado, inundaciones, sequías, carencia de nieves, plagas, hambrunas y toda una serie de calamidades ya relatadas en la Biblia y que

ahora se repiten; épocas de vacas gordas y de vacas flacas; hacia estas últimas caminamos. Gerald Brenan nos hablaba, en su obra El laberinto español, sobre la visión de un viajero británico en la Edad Media, que hacía una descripción de España comparándola al desierto de Abisinia; coincide esta visión con la leyenda, sobre una época, en la que una ardilla podía cruzar la península ibérica, de norte a sur, saltando de árbol en árbol; quizás estemos caminando hacia la descripción del viajero británico y en el 2050 nos encontremos más en una tierra desolada que en un paraíso. Los humanos somos muy poca cosa para alterar el orden del Universo y su climatología… pero contribuimos en lo que podemos con nuestros egoísmos.

MANUEL GARCÍA LINARES

Artista polifacético. Pintor

Una de las cosas que lleva tiempo investigándose es la manera en que la subida global de las temperaturas irá afectando a la circulación general de la atmósfera. Es un asunto complejo cuyo conocimiento todavía es limitado, pero que irá arrojando pistas sobre el clima futuro; algo que todavía no está bien resuelto por parte de los modelos climáticos. En el próximo capítulo se abordará con cierto detalle cómo está respondiendo la dinámica atmosférica al forzamiento que provocan las temperaturas en alza. Cada cosa a su tiempo, tengo todavía que contarle algunas cosas interesantes.

El calentamiento global que estamos teniendo en la Tierra se manifiesta por un ascenso de la temperatura, que en estos momentos es aproximadamente 1,2 ˚C más alta que la que había a mediados del siglo XIX. Tomando como referencia el valor de la temperatura durante un período climatológico normal (de treinta años), lo normal es representar la evolución que ha tenido esa variable meteorológica con las anomalías que presenta cada año. Anomalías negativas se corresponden con años frescos, fríos o muy fríos, y positivas con años templados, cálidos o muy cálidos.

Las gráficas de las anomalías de temperatura experimentadas tanto en el conjunto de la Tierra como en la mayor parte de los lugares del mundo donde hay registros termométricos son elocuentes. Llevamos muchos años —varias décadas— con anomalías positivas. La cantidad de meses seguidos en que se vive esta situación en la Tierra se acerca a 450, pero es que, además, la magnitud de las citadas anomalías ha aumentado significativamente durante los últimos años. Nos hemos instalado en la zona roja. Ayuda a verlo de esta forma una representación gráfica que seguramente conocerá, concebida en 2018 por el climatólogo de la Universidad de Reading, en Reino Unido, Ed Hawkins.

Tan llamativa gráfica se ha bautizado como Warming Stripes, que podemos traducir como «calentamiento a rayas». La idea es muy simple, pero consigue con gran eficacia visualizar no solo la inexorable subida de la temperatura, sino la magnitud que está adquiriendo en lo que llevamos de siglo. Lo único que hizo Ed Hawkins fue establecer una escala de colores que van desde una gama de azules hasta una de rojos, asignando a cada anomalía (positiva o negativa y de mayor o menor magnitud) un color dado. Basta un único y rápido vistazo a esta especie de código de barras para tener clara cuál ha sido la evolución de la temperatura en el último siglo y medio y dónde nos encontramos en este momento: en la zona roja, la parte de la derecha. Los años azules son ya cosa del pasado.

Ahora, la única novedad que nos depara cada año nuevo es la magnitud de la anomalía positiva (la intensidad del color rojo), no su signo, pues sabemos que será positivo. Actuando con la urgencia que demandan los científicos, aunque ya no logremos invertir la escala de colores y pasar a una zona azul, sí que podremos conseguir que las rayas no sean de colores rojos tan oscuros. En ese escenario cálido, pero no tanto, nuestra adaptación no será excesivamente traumática. El Sexto Informe del IPCC insiste en la misma idea que los anteriores: la única posibilidad que tenemos para tratar de ralentizar el calentamiento global pasa por cortar el grifo a nuestras emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, lo que es incompatible con el modelo (insostenible) de crecimiento económico actual. Si mantenemos el modelo, la única fórmula posible es el decrecimiento, lo que también apunta el AR6

en su tercera parte, dedicada a la mitigación del cambio climático. Para seguir creciendo, necesariamente tenemos que cambiar profundamente nuestro modelo de sociedad. El reto es mayúsculo, pero no imposible, aunque el tiempo juega en nuestra contra.

De momento, nos hemos instalado en la zona roja y lo hemos hecho en un visto y no visto a escala geológica. Desde que finalizó la última glaciación y comenzaron a remontar las temperaturas en la Tierra, no se ha experimentado en ningún período un ritmo de subida tan grande como el actual. También se acumulan las evidencias que apuntan a que nunca antes en el Holoceno hemos tenido una temperatura tan alta a escala planetaria. Además, si hacemos caso a las proyecciones climáticas, el calentamiento global solo ha empezado a tomar carrerilla. No tenemos que irnos a finales de siglo para pensar en escenarios más cálidos que el actual. La tercera década del presente siglo ha comenzado con las temperaturas en todo lo alto y todo apunta a que seguirán repuntando los años venideros.

El año pasado la Organización Meteorológica Mundial (OMM) señaló que entre 2021 y 2025 el calentamiento global aumentará de magnitud de manera significativa, batiéndose récords de calor, con los impactos que ello conlleva. Tomando como base los datos publicados por el Met Office (Servicio Meteorológico de Reino Unido), existe un 90 % de probabilidades de que al menos un año del citado período llegue a ser el más cálido de toda la serie histórica (época instrumental), desbancando a 2016 del primer puesto. La cosa no queda ahí, ya que con las estimaciones más recientes —dadas a conocer este mismo año—, las probabilidades de que durante el período 2022-2026 la temperatura media anual supere de forma transitoria el umbral del grado y medio de subida con respecto a los niveles preindustriales (principal objetivo de no superación incluido en el Acuerdo de París) han aumentado hasta cerca del 50 %, cuando las estimaciones que se barajaban el último quinquenio eran del 10 % y en 2015 próximas a cero. Parece claro —en base a la información climática más actualizada— que en el presente lustro el calentamiento global no nos va a dar tregua. Seguiremos instalados en la zona roja, con nuevas rayas de color rojo más oscuro en el gráfico de Ed Hawkins.

LA NUEVA NORMALIDAD

Estamos dirigiéndonos a pasos agigantados hacia un nuevo escenario climático que no llegaron a conocer nuestros antepasados. Lo que antes era excepcional ahora es normal y tendremos que irnos adaptando a esa nueva normalidad. El clima se está volviendo más extremo. La anterior frase se ha convertido en una especie de mantra, pero sintetiza bien lo que está aconteciendo. Hay quienes lo ponen en duda, argumentando (no sin parte de razón) que ahora nos enteramos al instante de cualquier adversidad meteorológica que ocurre en el mundo y que, además, la gran magnitud que alcanzan los desastres ligados a inundaciones, huracanes, tormentas… es debida principalmente a nuestra negligencia; por ejemplo, al construir edificios o infraestructuras en lugares inapropiados. Estos argumentos se pueden defender y ayudan a entender parte de la realidad de los hechos, pero no toda ella. Los extremos climáticos están yendo a más y dicha circunstancia es la que nos está llevando a esa nueva normalidad en el clima, nunca vista por los seres humanos.

La expresión «extremo climático» alude tanto a un fenómeno meteorológico como a uno climático (extremo en cualquiera de los dos casos). El IPCC en sus informes, por simplificar, se refiere únicamente a fenómenos climáticos extremos, con independencia de su naturaleza. Entre los extremos climáticos podemos tener lluvias torrenciales, temporales de viento, nevadas, sequías, inundaciones, olas de frío y de calor, tornados, ciclones tropicales y un largo etcétera. Su principal característica es el elevado impacto que tienen en la población, así como los importantes daños materiales a los que dan lugar. Los costes económicos de los extremos climáticos no han parado de crecer desde que el cambio climático entró en escena, convirtiéndose en un elemento desestabilizador para las economías de muchos países, especialmente los del tercer mundo.

La educación ambiental debe estar continuamente presente, promoviendo nuevos valores que generen hábitos responsables y una mejor comprensión de la situación delicada por la que está atravesando nuestro planeta.

FEDERICO VELÁZQUEZ DE CASTRO

Presidente de la Asociación Española de Educación Ambiental

La magnitud con la que el clima se está volviendo más extremo se ha podido cuantificar gracias a minuciosos análisis de las observaciones meteorológicas diarias obtenidas en todo el mundo. Si no hubiera calentamiento global inducido por nuestras actividades, tendríamos ocho veces menos récords de calor que los que se observan y también un número significativamente menor de récords de precipitación, cuya intensidad aumenta a medida que va calentándose la baja atmósfera. La inexorable subida de la temperatura media global —a un ritmo actual de un par de décimas de grado Celsius por década— está provocando un importante aumento en la frecuencia de extremos, tanto de altas temperaturas como de precipitación. Además, es en las regiones tropicales donde se está produciendo una mayor tasa de aumento de esos extremos, lo que hace más vulnerable aún a su población, en su mayoría tercermundista.

No hace falta irse a los trópicos para empezar a experimentar la nueva normalidad climática. En Europa se están registrando sequías de gran magnitud en los últimos años, sin que existan muchos precedentes similares en los últimos dos milenios. La principal singularidad ha comenzado a acontecer desde 2015 hasta la actualidad en amplias zonas de Europa Central, con una intensificación de las sequías en verano que comienza a pasar factura en la masa forestal. En el sur del viejo continente las sequías son endémicas (son uno de los rasgos de identidad del clima mediterráneo), pero también se detecta una tendencia a aumentar y a ser más intensas. Paralelamente, en la cuenca mediterránea se constata un aumento de las lluvias torrenciales y de las

inundaciones catastróficas.

En un informe elaborado por el Servicio Meteorológico de Suiza en el otoño de 2021, se analizó con detalle tanto la distribución espacial como la frecuencia de los episodios de precipitaciones extremas en el Mediterráneo. Mientras que en la parte oriental de la cuenca son más frecuentes en invierno, en la occidental dominan los episodios otoñales, si bien cada vez irrumpen más en otras épocas del año. Se constata, además, que estos episodios de lluvias torrenciales tienen una fuerte tendencia a encadenarse. Si consideramos una misma área (por ejemplo, Baleares), uno de cada cinco eventos de precipitación extrema ocurre inmediatamente después de otro episodio similar.

Aunque en el capítulo 5 entraremos de lleno en las proyecciones climáticas, esta nueva normalidad que comienza a detectarse tanto en Europa como en el resto del mundo será cada vez más evidente. Los veranos se volverán más secos en la mayor parte del continente europeo según discurra el presente siglo. Los únicos lugares que podrán ser más húmedos que los actuales son Escandinavia y la región alpina. Para toda Europa, en general, se prevé una disminución neta de la disponibilidad de agua, lo que plantea un gran desafío, al margen del generado ahora por la invasión rusa de Ucrania. Varias veces por década tendremos olas de calor extraordinarias. Paralelamente, también se prevé que los extremos húmedos sean más frecuentes a medida que vayamos teniendo esos veranos más secos. Es decir, episodios de lluvias muy intensas, concentrados en el tiempo, del tipo de los que vemos que ocurren a veces en el Mediterráneo. La torrencialidad irá a más, en la medida en que el aire siga calentándose y aumentando su capacidad de contener vapor de agua.

Si subimos de latitud el panorama no cambia mucho. Un caso muy llamativo es el de Siberia. Allí, en aquel vasto territorio, las grandes anomalías cálidas y los incendios forestales están a la orden del día. Históricamente, Siberia se asocia al frío, al intenso frío, a unas temperaturas que, con frecuencia, son escandalosamente bajas, de varias decenas de grados Celsius por debajo de cero, y a las tremendas olas de frío polar generadas en aquel gigantesco congelador de la Tierra, conocidas en el argot meteorológico como

«siberianas». Sin embargo, a la vista de la magnitud y la velocidad con la que el calentamiento global se está manifestando allí (en el Ártico, en general), el calor siberiano está restando protagonismo mediático al frío, de ahí que no sería extraño empezar a identificar las siberianas con los episodios de calor extremo.

El año 2020 fue extraordinariamente cálido en Siberia. El 20 de junio se alcanzaron 38 °C en Verjoyansk, localidad rusa situada a unos 115 kilómetros al norte del Círculo Polar Ártico. Desde la Organización Meteorológica Mundial se certificó la validez del registro termométrico, atribuyéndose al cambio climático. Ocurrió algo similar con la extraordinaria ola de calor que se produjo en el oeste de Canadá y noroeste de los EE. UU. en el verano de 2021, alcanzándose una temperatura de casi 50 °C en una localidad de la Columbia Británica. El Ártico se está calentando a más del doble de velocidad de la media mundial, y todo apunta a que asistiremos cada vez con mayor frecuencia a episodios de calor extremo en latitudes altas del hemisferio norte, donde —como veremos en el próximo capítulo— la pérdida masiva de hielo es ya una realidad.

Una de las cuestiones que se están estudiando más a fondo es de qué manera se realimentan el calentamiento que está experimentando el Ártico y el comportamiento del vórtice polar, que últimamente discurre formando grandes ondulaciones (similares a los meandros de un río), lo que favorece las incursiones de aire cálido de origen subtropical hacia el norte, con las consiguientes olas de calor que estamos observando. Estas situaciones —cada vez más frecuentes en Siberia— dificultan la generación estable (duradera en el tiempo) de la enorme masa de aire frío polar continental. Antes de que el calentamiento global entrara en escena eran relativamente frecuentes los «desbordamientos» de aire gélido por los bordes del gigantesco anticiclón siberiano, entre mediados del otoño y mediados de la primavera, generándose algunos años las siberianas, a las que antes me referí.

Aunque esas situaciones puramente invernales siguen y seguirán produciéndose en el futuro, su magnitud y frecuencia irán a menos. Estamos viendo a una velocidad mayor de la pronosticada un drástico cambio en la distribución del frío y el calor en Siberia,

donde las anomalías positivas de temperatura apuntan claramente hacia arriba. Las proyecciones climáticas que empezó a dar a conocer el IPCC en su primer Informe (AR1, año 1990), ya señalaban que la magnitud del calentamiento global en latitudes altas del hemisferio norte iba a ser significativamente mayor que en otras regiones de la Tierra, pero el ritmo de la subida ha desbordado las predicciones. La nueva normalidad ya está aquí, en Siberia, en Europa, en los trópicos, en la Antártida… en el mundo.

III.

CONEXIONES CLIMÁTICAS

Todo está conectado en la atmósfera. No en vano el aire es un medio continuo, sin fronteras, lo que hace que lo que ocurre en unas zonas de esa envoltura gaseosa que forma la piel de la Tierra repercuta en otras. De esas conexiones meteorológicas se pueden inferir las climáticas, pero, como veremos en el presente capítulo, el concepto clásico de clima, entendido como el comportamiento atmosférico a lo largo de un período de tiempo lo suficientemente largo, ha quedado caduco. El cambio climático no debe entenderse solo como el cambio del clima, sino como los cambios que están aconteciendo en el sistema climático, que es un concepto moderno mucho más amplio, que explicaré con cierto detalle en esta parte del libro.

El calentamiento global no es algo que solo se esté manifestando en la atmósfera; tiene su reflejo (sus impactos) en el resto de componentes (interconectados con ella y entre ellos) que conforman el citado sistema climático, también llamado sistema Tierra. Aunque las proyecciones climáticas se focalicen en variables meteorológicas de interés como la temperatura (del aire) o la precipitación. Todo ello conlleva cambios en los océanos —como el calentamiento de las aguas y la subida del nivel del mar—, en las grandes masas de hielo de la Tierra —que están mermando con celeridad—, en los ecosistemas y las formas de vida animal y vegetal de la Tierra —problemas de adaptación y pérdida de biodiversidad— e incluso en la morfología terrestre. En este capítulo comentaremos algunos de los cambios que ya se están produciendo y sus consecuencias. Entenderemos hasta qué punto todo está conectado y cómo son justamente esas conexiones las que introducen complejidad al comportamiento del clima. Sabemos ya muchas cosas de él, pero sigue habiendo un mundo oculto por descubrir.

DEL CLIMA AL SISTEMA CLIMÁTICO

En los dos primeros capítulos del libro se ha hecho alguna mención al sistema climático, pero no he explicado aún qué es este importante modelo conceptual. Ha llegado el momento de hacerlo. Hace tiempo que el concepto de clima evolucionó hacia el de sistema climático o sistema Tierra. El círculo se cierra. Todo está interrelacionado en el planeta. Si bien en la atmósfera los cambios se manifiestan más rápido que en los otros componentes del citado sistema (que describiremos en este apartado someramente), los cambios se terminan transmitiendo por todo ese complejo sistema natural, poniendo a prueba su propia estabilidad. En ese punto nos encontramos en este momento.

No se puede entender el cambio climático solo como una cuestión puramente atmosférica. La atmósfera está acoplada con los océanos (hidrosfera), con las grandes masas de hielo (criosfera), con la biosfera (de la que formamos parte) y con la parte sólida de la superficie terrestre (litosfera). Cualquiera de estos componentes actúa sobre todos los demás, si bien cada uno evoluciona en escalas temporales diferentes, lo que dificulta el estudio integral del clima como un todo. A pesar de las dificultades, cada vez conocemos más cosas del sistema climático y de cómo evolucionó en el pasado.

La atmósfera se suele definir como la envoltura gaseosa que rodea la Tierra, pero tal y como me indicó con acierto, hace unos años, Javier Martín Vide, prestigioso climatólogo y prologuista del libro, es una definición imprecisa, ya que la atmósfera también forma parte de la Tierra, por lo que es más adecuado señalar que envuelve la superficie terrestre. En el colegio nos enseñaron a recitar de carrerilla las cinco capas en que se divide, que de abajo arriba, y atendiendo al distinto comportamiento de la temperatura en ellas al desplazarnos en la vertical, son la troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera.

Según ascendemos por la atmósfera la densidad del aire disminuye

de forma progresiva, sin que podamos fijar con precisión dónde se sitúa el límite exterior atmosférico. En meteorología, ese tope queda establecido a trescientos kilómetros de altitud. La mayor parte de los fenómenos meteorológicos tienen lugar en la troposfera, donde se concentra el 75 % de la masa atmosférica y el 99 % del vapor de agua. En latitudes medias esa primera capa alcanza un espesor de unos once kilómetros y es justamente en ella donde está subiendo la temperatura debido al aumento del efecto invernadero. Por encima (en la estratosfera) el aire se está enfriando. Es importante conocer este detalle: el calentamiento global solo se manifiesta en la baja atmósfera.

Las nubes son uno de los elementos que más quebraderos de cabeza plantea a los especialistas en clima. Su modelización es compleja, no exenta de dificultades. Es complicado precisar, sin demasiada incertidumbre, cómo actúan en el balance energético global. Gracias a los satélites sabemos más o menos bien cuál es la cobertura nubosa global y cómo va variando con el paso del tiempo, pero el problema es que dependiendo del tipo de nube y, sobre todo, de dónde se sitúe la nubosidad en la atmósfera, contribuye a enfriar o a calentar el aire situado por debajo de ella. Mientras que las nubes más bajas y de mayor espesor forman una pantalla muy eficaz a la radiación solar y contribuyen a enfriar, con las nubes altas y más delgadas ocurre justo lo contrario: contribuyen a retener calor.

En un mundo más cálido, como el que apuntan las proyecciones climáticas, aumentará la evaporación y también la nubosidad a escala global. La contribución neta de las nubes es a enfriar, contrarrestando el calentamiento global. El problema es que, paralelamente a ese hecho, también se prevé que aumenten los aerosoles —tanto los de origen natural que escapan al aire, como las sales marinas o el polvo mineral, como los que generamos nosotros—. Estas partículas intervienen en los procesos de formación de las nubes y de la precipitación, contrarrestando su efecto neto refrigerante. En cualquier caso, se requieren más investigaciones para reducir la incertidumbre asociada al papel clave que pueden desempeñar las nubes en el marco del cambio climático actual.

Tampoco podemos olvidarnos del importante rol que desempeñan el resto de componentes del sistema climático, con la hidrosfera a la cabeza. Engloba toda el agua líquida que hay sobre la corteza terrestre (océanos, mares, ríos, lagos…) y en el subsuelo (acuíferos, corrientes subterráneas). En la división que se usa en las ciencias de la Tierra incluye también el agua en estado sólido (hielo, nieve, permafrost); sin embargo, como veremos un poco más adelante, la criosfera es un componente más del sistema climático, que interacciona con la hidrosfera.

Casi tres cuartas partes de la superficie terrestre están cubiertas por agua, la mayoría de la cual (el 97 %) está contenida en los océanos. El 3 % restante es agua dulce y de ella algo más del 98 % está congelada, concentrada principalmente en la Antártida y Groenlandia. Así las cosas, el agua dulce disponible para el consumo es una pequeñísima fracción de la totalidad del agua que constituye la hidrosfera. Los océanos condicionan el tiempo y el clima en todo el mundo. Su calentamiento es una realidad tangible, cuyas consecuencias comienzan a notarse e irán a más. Son grandes sumideros de carbono. Uno de los datos que se suele dar por bueno es que el 90 % del CO2 que los seres humanos emitimos a la atmósfera es absorbido por los océanos, pero esto puede empezar a cambiar en un futuro no muy lejano.

Si no reducimos rápida y drásticamente la quema de combustibles fósiles corremos el riesgo de que el agua oceánica pierda, a pasos agigantados, su capacidad de absorber CO2, lo que aceleraría más el calentamiento global. La acidificación de las aguas, debida a esa absorción de carbono procedente de nuestras actividades, está alterando los procesos químicos que tienen lugar en los océanos, y si ese proceso va a más también modificará su papel como reservorios de CO2, con el cúmulo de consecuencias que ello puede acarrear. Este asunto es crucial y todavía tenemos importantes lagunas de conocimiento que —al igual que nos pasa con las nubes — hemos de ir subsanando.

La criosfera, como ya se ha apuntado, engloba a toda el agua que se halla en estado sólido en la Tierra, bien sea por encima o por debajo de la superficie terrestre, tanto en zonas continentales como marítimas. Incluye a los hielos marinos, lacustres y fluviales, la

nieve depositada sobre tierra firme, los glaciares, los grandes mantos de hielo —tanto de la Antártida como de Groenlandia— así como el permafrost, el terreno congelado temporal o permanentemente. La criosfera está fuertemente acoplada con la hidrosfera y también, aunque en menor medida, con la atmósfera. Es un importante modulador del clima terrestre y su evolución es clave en la suerte que vaya corriendo el calentamiento global. El elevado poder reflectante (alto albedo) de la nieve y el hielo es un regulador natural de la temperatura media planetaria. Una menor superficie helada implica una mayor absorción de calor en la Tierra, con el consiguiente aumento de temperatura.

Nos quedan dos componentes del sistema climático por comentar: la biosfera y la litosfera. La primera incluye a todos los seres vivos de la Tierra, entre los que estamos nosotros. Las formas de vida se localizan en la parte baja de la atmósfera, en los océanos y en las capas superficiales del suelo de todas las tierras emergidas, tanto las áreas continentales como las islas. La biosfera está interrelacionada con las demás componentes del sistema climático a través de procesos como la respiración de los animales o la evapotranspiración de las plantas, aparte de los que intervienen en los ciclos del carbono y el nitrógeno. Aunque he comentado que se extiende por las capas superficiales del suelo, se han detectado bacterias y arqueas extremófilas en niveles bastante profundos de la corteza terrestre, en lugares donde hasta hace poco no se sospechaba que pudiera haber vida.

En cuanto a la litosfera, así, de primeras, no la asociamos con el clima. Es la tortuga del sistema climático, ya que sus cambios se manifiestan en períodos de tiempo muchísimo más largos que los que acontecen en los otros subsistemas. La liebre sería la atmósfera, seguida por los océanos y los hielos. La litosfera es la capa superficial de la parte sólida de la Tierra, tanto continental como oceánica. Está formada por la parte rocosa y rígida de la corteza terrestre y por la zona exterior del manto superior, dotada de elasticidad. Es su parte superficial la que interacciona con el resto de componentes del sistema climático. Pongo un par de ejemplos, para entender de qué manera.

Los accidentes geográficos interaccionan con el aire y condicionan

la dinámica atmosférica. Sin la distribución actual de océanos y continentes, ni de las grandes cordilleras en estos últimos, el tiempo se comportaría de manera muy diferente a la observada. No se puede entender la historia climática de la Tierra sin tener en cuenta cómo ha ido cambiando la configuración de las grandes masas continentales y oceánicas. Por otro lado, no pensando en procesos que duran millones de años, sino en el día a día, el viento arrastra e incorpora a la atmósfera enormes cantidades de partículas procedentes de los grandes desiertos y las zonas áridas. Todos esos materiales —de origen litosférico— fertilizan las aguas oceánicas e intervienen decisivamente en los procesos de precipitación en las nubes.

ACCIÓN-REACCIÓN EN LA ATMÓSFERA

La condición de fluido del aire —lo mismo que el agua— hace que en la atmósfera todo esté conectado, de manera que los cambios que ocurren en una región de ella se terminan transmitiendo al resto (lo que ilustra el famoso «efecto mariposa»). Las masas de aire están en continuo movimiento como consecuencia de los cambios de presión que se producen constantemente en el seno del medio atmosférico, dictados, a su vez, por las diferencias de temperatura que se dan entre unas zonas y otras. Si el planeta entra en una fase fría como una glaciación, o en una cálida como la actual, dicha circunstancia provocará irremediablemente cambios en los patrones de la circulación general atmosférica.

En la primera parte del Sexto Informe del IPCC —dedicada a las bases físicas de la ciencia del cambio climático— se refuerzan las afirmaciones que se hicieron en los cinco informes precedentes. Por un lado, se indica que los cambios recientes en el clima son generalizados, rápidos y cada vez más intensos. El calentamiento global en el que estamos inmersos no tiene precedentes en miles de años y su principal singularidad es que lleva nuestra marca. El clima, tal y como ya indiqué e insistiré, se está volviendo más extremo y esa tendencia viene de la mano de comportamientos anómalos en la circulación atmosférica, que empezamos a observar.

Si no hay cambios en la tendencia actual, en 2050 —año que, por cierto, nos queda más cerca que 1990— el clima en muchas regiones del planeta no será igual al de hoy. Los que sí seremos iguales a los de hoy seremos los Homo sapiens, ya que las modificaciones genéticas van más lentas. Que ese mundo de mediados de siglo nos resulte cómodo y satisfactorio para vivir dependerá de lo que hagamos ahora. La vida en la Tierra, en cualquier caso, seguirá su curso.

XURXO MARIÑO

Neurobiólogo y divulgador científico

El IPCC se pronuncia sobre ello en el AR6, aunque lo hace con cautela, ya que la gran variabilidad del comportamiento atmosférico a diferentes escalas le impide ser categórico. Por ejemplo, establece bajos y medios niveles de confianza a cambios de frecuencia en los ciclones extratropicales (borrascas) del Atlántico Norte. No es que la actividad ciclónica en esa región oceánica no se esté viendo afectada por el ascenso global de la temperatura (tanto del aire como del agua superficial de los océanos), pero no resulta sencillo establecer tendencias a partir del comportamiento observado en las últimas décadas.

A lo que el IPCC sí que da un nivel de confianza alto es a la expansión hacia latitudes altas de las células de Hadley, indicando que para el caso particular de la célula situada en el hemisferio norte dicha expansión y desplazamiento hacia el norte se constata desde 1980. Esa subida de latitud conlleva un mayor número de incursiones del chorro subtropical en la zona templada (latitudes medias), aumentando, en consecuencia, las interacciones entre ese chorro y el polar, lo que tiene importantes implicaciones, por ejemplo, en los vuelos trasatlánticos. A esto hay que sumar los cambios profundos que están teniendo lugar en el Ártico.

Desde 1979 (año en que comienza a haber datos de satélite de esa región terrestre) la banquisa polar ha reducido su tamaño en un 40 % (dato aportado por el IPCC). La magnitud que está teniendo el calentamiento global allí está provocando un debilitamiento del vórtice polar, lo que a su vez induce cambios en el chorro homónimo, ondulándose más de la cuenta. Aunque la variabilidad del chorro polar es muy grande, son cada vez más frecuentes las incursiones de aire muy frío de origen polar hacia el sur, alternando con incursiones en sentido contrario, hasta latitudes altas, de aire cálido de origen subtropical. La mayor debilidad del vórtice polar provoca en él mayores fracturas que se traducen en un chorro polar

menos continuo e intenso, que forma grandes ondulaciones, similares a los meandros de un río.

La combinación de un chorro polar más ondulado, formando esos grandes meandros, con las incursiones hacia el norte del chorro subtropical tiene importantes implicaciones en la dinámica atmosférica que acontece en latitudes templadas. Estamos empezando a observar el resultado de una reacción en cadena que está teniendo lugar en una troposfera que cada vez está más caliente. En el marco climático actual, se dan con mayor frecuencia unas condiciones favorables para que una borrasca atlántica ligada al chorro polar interaccione con el subtropical y adquiera unas características distintas a las que tenía en origen, dando lugar a episodios de lluvia más extremos, pues su potencial de agua precipitable aumenta sustancialmente.

2050: HA CAMBIADO EL CLIMA TERRESTRE

Sí, el ser humano ha conseguido cambiar el clima terrestre. Décadas de informes del IPCC, de avisos de la comunidad científica sobre la gravedad del proceso que se estaba produciendo en nuestra atmósfera, de promesas incumplidas de reducción en la emisión de gases de efecto invernadero pese a los acuerdos internacionales, no han servido para apenas nada. En la década de los años 20 pensábamos que la situación se podía enderezar; Europa fijó sus objetivos de progresiva descarbonización de la economía, Japón, Australia, Nueva Zelanda desarrollaron medidas contundentes de reducción de emisiones; incluso, EE. UU., bajo la Administración demócrata hizo una apuesta por la reconversión de los sectores contaminantes de su economía. Pero no fue posible detener el proceso.

La atmósfera terrestre ha seguido calentándose, hasta alcanzar casi los 2 °C de subida cincuenta años antes de lo esperado. Los océanos han seguido acumulando calor, expandiéndose, y la fusión de los hielos ha alcanzado valores preocupantes. En verano apenas queda hielo en el Ártico, y los barcos están aprovechando las nuevas rutas abiertas en el Océano Glaciar entre Asia, Europa y Norteamérica. En

España, nuestro clima se ha vuelto poco confortable en muchas zonas, con noches en verano muy poco soportables y con lluvias que han disminuido su aparición, pero que en ocasiones caen con mucha fuerza generando importantes daños. Lo bueno es que muchas ciudades se han tenido que preparar, que adaptar, y son ahora más verdes, más seguras ante eventos extremos. Pero ya no tenemos el clima de hace medio siglo. Vivimos en un ambiente de gran incertidumbre. Y todo parece que va a seguir igual, o peor, de aquí a final de siglo. Nos lo anunciaron, nos avisaron reiteradamente, pero no quisimos hacer mucho caso. El ser humano ha conseguido cambiar el clima.

JORGE OLCINA CANTOS

Geógrafo. Director del Laboratorio de Climatología de la Universidad de Alicante

La gran variabilidad intrínseca al comportamiento atmosférico dificulta nuestra comprensión de los cambios en su dinámica atribuibles al cambio climático, a pesar de lo cual la gran producción de artículos científicos arroja cada vez resultados más clarificadores de las consecuencias que el calentamiento global está teniendo en las distintas piezas que conforman la máquina del clima. En un artículo publicado en 2018, Mann y Rahmstorf dedujeron que es probable que los eventos cálidos en latitudes altas que amplifican la ondulación de la corriente en chorro (polar) aumenten en un 50 % si las emisiones de gases de efecto de invernadero a la atmósfera siguen aumentando al ritmo actual. El ambicioso —a la vez que necesario— objetivo de la descarbonización neta total en 2050 es la única vía que tenemos a nuestro alcance para que a finales de siglo la temperatura media global no supere en más de 2 ˚C los valores preindustriales y las corrientes en chorro no se comporten de manera muy diferente a como lo hacen ahora.

En otro artículo más reciente, publicado a finales del verano de 2021 en la revista Proceedings of the National Academy of Science

(PNAS), se indicaba que de seguir emitiendo CO2 a la atmósfera como hasta ahora, sin ser capaces de quebrar la curva ascendente de emisiones, el chorro polar del Atlántico Norte podría migrar fuera del rango de su variabilidad natural hacia el año 2060, al margen del aumento de intensidad que ya comienza a detectarse en él. Las desviaciones significativas de su comportamiento normal nos llevarían a un territorio desconocido, en el que algunas de sus consecuencias se pueden intuir, pero de momento no se pueden simular.

La aviación comercial es una de las actividades que más pueden verse afectadas por los cambios en las corrientes en chorro, ya que estas son fundamentales en la planificación de vuelo, permitiendo a las compañías aéreas acortar la duración de muchos de sus trayectos y ahorrar combustible. Pensando también en la experiencia a bordo de los pasajeros, todo apunta a que en el futuro los vuelos en avión serán más movidos, debido al previsible aumento de la turbulencia en aire claro (CAT). La presencia de CAT intensa en las inmediaciones de las corrientes en chorro, a las altitudes de crucero típicas a las que vuelan los aviones comerciales (en torno a los 10.000 metros), podrá duplicarse e incluso triplicarse a partir de 2050 si el calentamiento global sigue desbocado.

Las corrientes en chorro no son los únicos elementos atmosféricos que están empezando a cambiar a medida que sube la temperatura; también lo están haciendo los ciclones —tanto tropicales como extratropicales—, pues en buena medida están ligados a ellas, aparte de verse influidos por otros factores que también están cambiando. Con respecto a la relación de la frecuencia de los mismos y el cambio climático no se puede ser concluyente, pero respecto a la intensidad tenemos cada vez más evidencias científicas que certifican la relación. Sin calentamiento global no veríamos una sucesión tan continua de fenómenos meteorológicos extremos, como, por ejemplo, lluvias torrenciales ligadas a danas, borrascas o huracanes.

La relación entre los ciclones tropicales y el cambio climático se viene estudiando desde hace décadas y en todo ese tiempo se ha mantenido un intenso debate científico, ya que los resultados que

han ido arrojando las distintas investigaciones han sido parciales y, en algunos casos, no lo suficientemente categóricos para disipar dudas. A finales de los años 80, el investigador estadounidense Kerry Emanuel vaticinó que el aumento de la temperatura global iría provocando huracanes cada vez más intensos, y eso es lo que han ido apuntando los numerosos estudios que se han ido publicando en los últimos treinta años, disponiendo cada vez de una información más detallada al respecto.

La gran variabilidad que presenta el comportamiento de los ciclones tropicales, con una frecuencia e intensidades muy diferente cada temporada, complica bastante el establecimiento de una relación robusta. Los datos sí que parecen apuntar en dos direcciones. Por un lado, se producen cada vez más procesos de rápida intensificación y, por otro, se observan cambios en las cantidades de agua precipitable que dejan estos gigantescos ciclones a su paso.

El minucioso análisis de los datos disponibles (entre otros, un archivo de imágenes de satélite de algo más de cuarenta años) permite constatar una mayor probabilidad de que un huracán, una vez que se forma, alcance la categoría 3. También se constata en los últimos años un aumento significativo de la actividad ciclónica tropical en el Atlántico Norte. Además, tanto las tormentas tropicales como los huracanes dejan ahora mayores cantidades de lluvia —tanto en intervalos trihorarios como la acumulada a lo largo de tres días— que con anterioridad a 1850. A esta conclusión llegó un estudio publicado este mismo año, justo mientras estaba preparando esta parte del libro.

LAS DOS CARAS DEL CLIMA FUTURO

Los escenarios que imagino para el 2050 tienen una cara dramática y otra optimista. Por un lado, lo que ya se observa: continuas y devastadoras catástrofes naturales que afectarán a los territorios más desfavorecidos del planeta y que desencadenarán importantes movimientos migratorios, con el desarraigo, la desigualdad social y los problemas políticos y económicos consiguientes. Por otro lado, nuevas realidades climáticas que podrían consistir, por ejemplo, en

la redefinición de las estaciones, en la configuración de nuevos ecosistemas o en el surgimiento de fronteras territoriales delineadas en función de microclimas. Y aquí llega la cara optimista: todo lo que de destructivo tiene el ser humano lo tiene también de creativo e innovador. Se desarrollarán tecnologías y nuevos modelos de habitabilidad que nos permitirán adaptarnos a la nueva realidad climática y que visualizo principalmente como ciudades y otros espacios burbuja. Creo más en la adaptabilidad a nuestro «nuevo» planeta Tierra que en la conquista interplanetaria, pero quién sabe.

RAQUEL RODRÍGUEZ RUBIO

Filóloga. Profesora de español en la Escuela Oficial de Idiomas

En lo que llevamos de presente siglo, también se observa cómo algunos huracanes y tormentas tropicales comienzan a discurrir por la parte oriental de la cuenca del Atlántico, rondando las Azores, Madeira o Canarias, o incluso acercándose alguno de ellos hasta la península ibérica. Las referencias históricas de este tipo de trayectorias son muy escasas. Hasta hace poco, era bastante raro que un huracán o una tormenta tropical discurriera por mitad del Atlántico y enfilara hacia Europa, pero hace unos años esto empezó a cambiar. A finales de la temporada de huracanes 2005, Vince y Delta rompieron las estadísticas. El hecho de que ambos surgieran con apenas un mes de separación puso encima de la mesa la posible conexión con el cambio climático.

Desde entonces, varios huracanes más han evolucionado por la zona oriental de la cuenca, al oeste de la península ibérica, como Ophelia (2017), Leslie (2018) —que a punto estuvo de tocar la costa portuguesa como un huracán—, los huracanes Lorenzo y Pablo (2019) o la tormenta subtropical Alpha (2020), que como tal tocó tierra en Portugal. Hasta la formación de Pablo había cobrado peso la teoría de que esas nuevas rutas obedecían al hecho de que cada vez es más frecuente que haya aguas superficiales cálidas en el Atlántico fuera del ámbito tropical; sin embargo, ese huracán obligó a replantear esa hipótesis de trabajo, abriendo más el abanico de

posibles factores.

La génesis de Pablo no tuvo lugar ni en el ámbito tropical ni en el subtropical, sino en latitudes medias, en una zona donde la temperatura del agua superficial del mar (SST) rondaba los 20 °C. Durante las horas que se mantuvo como huracán (el 27 de octubre de 2019) y en el trayecto que recorrió como tal, estuvo en una zona oceánica con una anomalía de SST ligeramente positiva, pero con unos valores muy alejados de los 26-27 °C que suelen tener las aguas por donde discurren los ciclones tropicales. Dicha circunstancia obliga a pensar que en este caso pesaron más los factores dinámicos que los termodinámicos. Las nuevas rutas de los huracanes en el Atlántico abren un apasionante campo de estudio, cuyo objetivo último es determinar de qué forma está afectando el calentamiento global a su dinámica.

Con la vista puesta en el futuro, algunas proyecciones climáticas apuntan a que a lo largo del presente siglo los ciclones tropicales podrán desplazarse hacia latitudes más altas, pudiendo afectar a zonas muy pobladas, principalmente del hemisferio norte. Esa podría ser la respuesta (la reacción a la que alude el título de este apartado) a la subida global de las temperaturas, al ascenso latitudinal de la circulación de Hadley, a los cambios en las corrientes en chorro y en la Zona de Convergencia Intertropical, que es donde surgen las tormentas que, una vez organizadas, terminan formando los ciclones tropicales. El Sexto Informe del IPCC da una alta confianza a la influencia humana en el fortalecimiento de los ciclones tropicales.

La lista de cambios observados y proyectados empieza a ser grande. Por ejemplo, parece que las sequías irán a más según vaya avanzando el presente siglo, afectando cada vez a más regiones de la Tierra y alcanzando una mayor magnitud. En gran parte del continente americano (incluida la Amazonia), en el sur de África, el sudeste asiático, Australia y Europa (con especial incidencia en la región mediterránea), se esperan sequías más duraderas que las actuales. Hay que tener en cuenta que según vaya aumentando la temperatura global, la atmósfera acumulará una mayor cantidad de vapor de agua, disminuyendo la precipitación particularmente en el ámbito subtropical, lo que provocará ese notable incremento de las

sequías en las zonas apuntadas.

La anterior circunstancia no es incompatible con un aumento de inundaciones como consecuencia de lluvias torrenciales. Un clima más extremo implica un reparto más irregular de las precipitaciones, tanto espacial como temporalmente, aunque no haya una tendencia clara al aumento o la disminución. Para entenderlo bien, pondré un ejemplo con datos inventados. Si en el lugar donde vives hay, en promedio, cuarenta días de lluvia al año y la precipitación media anual es de 500 mm, podríamos pasar a tener 470 mm (es decir, casi la misma lluvia al año), pero acumulada en 25 días, de manera que algunos de ellos llovería torrencialmente y tendríamos más días al año con sequía meteorológica. Previsiblemente, iremos viendo cambios significativos en los patrones regionales de precipitación, aumentando las sequías en unas zonas y las lluvias torrenciales en otras.

La estrategia para reducir emisiones de gases de efecto invernadero debe incluir con urgencia la subsanación del error histórico del cambio de hora. Para ello, España debería mantener todo el año el actual horario de invierno, mucho más próximo al mediodía verdadero, y no adelantar ya más la hora entre marzo y octubre. El mito del ahorro energético con el horario de verano es historia pasada. Si la sociedad quiere comprometerse con la salvaguarda del planeta y su clima debe renunciar a un horario totalmente desajustado respecto a los ciclos naturales, lo que, en mi opinión, favorece en exceso el consumo y el gasto energético a causa del desajuste con el ritmo solar.

VICENTE AUPÍ

Escritor y divulgador científico

Terminaremos este repaso a algunas de las reacciones que el

calentamiento global está provocando en distintos actores de la escena meteorológica, dos de ellos muy conocidos: El Niño y La Niña. Con estos nombres se conocen las dos fases del ENSO (El Niño Oscilación Sur), que dan lugar a un calentamiento/enfriamiento anómalo de las aguas del Pacífico tropical, lo que provoca cambios en los patrones meteorológicos y oceánicos a ambos lados de esa gran cuenca oceánica, aparte de anomalías de distinto signo en las precipitaciones de distintas regiones del mundo. Algunos estudios recientes sugieren que el ENSO irá perdiendo notoriedad frente a la poderosa señal del calentamiento global de origen antrópico. Es algo que ya comienza a constatarse y que, previsiblemente, irá a más en las próximas décadas.

ALGO PASA EN EL ÁRTICO

El Ártico está haciendo aguas, literalmente. En ninguna otra región de la Tierra son más visibles los impactos del cambio climático. La pérdida de hielo está alterando sobremanera el paisaje y los ecosistemas. La razón por la que ese lugar del mundo se está calentando mucho más rápido que el conjunto del planeta es bien conocida. Desde que comenzaron a realizarse proyecciones de cambio climático, los modelos apuntaban que el calentamiento global tendría una magnitud mayor en latitudes altas del hemisferio norte que en el resto de la Tierra. Si a nivel planetario la subida de temperatura es de 1,2 °C con respecto al valor promedio de la segunda mitad del siglo XIX, en el Ártico esa subida es de 3 °C en la actualidad. La razón por la que esto es así reside principalmente en el acelerado deshielo que está teniendo lugar allí. El que haya cada vez una mayor superficie marina desprovista de la cubierta blanca de la banquisa polar hace que se absorba más radiación solar, lo que refuerza el calentamiento en la región, fundiéndose cada vez más hielo. Es lo que se conoce como una retroalimentación positiva.

En el ámbito del cambio climático, una retroalimentación es un proceso que al producirse da lugar a otros procesos que terminan influyendo en el proceso inicial, o bien reforzándolo, o bien reduciéndolo. En el sistema climático hay continuamente forzamientos, tanto externos (como, por ejemplo, una variación de la energía que nos llega del Sol), como internos, que dan lugar a procesos de retroalimentación. El papel que juega el hielo o el vapor de agua, en el contexto actual de calentamiento global, ofrece buenos ejemplos de retroalimentaciones positivas. Si la temperatura sigue subiendo, la citada pérdida de hielo en el Ártico será cada vez mayor. La banquisa ártica está condenada a desaparecer, a menos que surjan en el sistema climático retroalimentaciones de signo contrario que contrarresten ese proceso.

El hielo marino en el Ártico no solo ocupa cada vez menos superficie, sino que también está disminuyendo de espesor y lo hace

a una velocidad cada vez mayor. Gracias a los datos proporcionados por el satélite CryoSat-2 de la Agencia Espacial Europea, se ha podido constatar que la disminución del grosor de ese hielo flotante en algunas regiones costeras ha estado avanzando a un ritmo entre un 70 % y un 100 % más rápido de lo que se pensaba (lo que planteaban los modelos). La evolución observada invita a pensar en que cada vez habrá más zonas marítimas costeras en el Ártico donde la banquisa no logre aguantar el deshielo de los veranos. Es algo que ya se observa en algunos enclaves, pero, previsiblemente, se generalizará.

Aunque la tendencia a reducirse la banquisa ártica es clarísima e indiscutible, su superficie está sometida a una gran variabilidad, con mínimos estivales que pueden oscilar en más de un millón de kilómetros cuadrados de unos años a otros. Ocurre a veces —cada vez más puntualmente— que durante algunos meses de algún año la superficie marina congelada llega a igualar o superar el valor promedio de un determinado período de referencia, lo que usan los negacionistas del cambio climático para argumentar falazmente que el hielo en el Ártico no está mermando. Las oscilaciones intra e interanuales en la superficie de la banquisa en ningún caso pueden cuestionar la reducción neta que está experimentando el hielo. Pero si hay algo que preocupa a los científicos es la pérdida de hielo antiguo; el que aguanta uno o más veranos boreales sin llegar a fundirse.

El hielo marino más antiguo y de mayor grosor del Ártico está desapareciendo al doble de velocidad que el hielo del resto de la banquisa polar ártica. En las dos subregiones del Ártico donde más abunda ese hielo antiguo y permanente se ha cuantificado que la fluctuación anual de su grosor es de 1,2 metros, pero a la vez se viene detectando una pérdida neta de cuarenta centímetros por década desde finales de los años 70, lo que da como resultado un metro y medio de adelgazamiento en las cuatro décadas transcurridas desde entonces. Dicha circunstancia hace cada vez más vulnerable a la banquisa ártica frente al calentamiento global y fija en un futuro no muy lejano el momento en que veremos el Ártico prácticamente libre de hielo en verano. Algunos especialistas sitúan esa fecha a lo largo de la cuarta década del presente siglo. Ocurra ahí o algo más adelante, lo que parece claro es que algo así

terminará sucediendo y probablemente sea usted testigo de ello.

En el Ártico no solo se está perdiendo hielo marino a mansalva; también lo está haciendo otro que hay más escondido, invisible a nuestros ojos y a los de los satélites. Como imagino que ya se habrá imaginado, me estoy refiriendo al permafrost, que es el nombre con el que se conoce al terreno congelado de forma permanente, que, en muchas zonas de Siberia, Alaska, el norte de Escandinavia y de Canadá está dejando de estarlo. El problema, como también sabrá, es que esta fusión libera a la atmósfera metano y CO2 contenidos en la materia orgánica enterrada en esa tumba de hielo desde hace miles de años. Estamos, por tanto, ante un proceso que de seguir yendo a más puede reforzar más aún el calentamiento global, amén de otros impactos como la liberación de virus y bacterias primitivas, que no sabemos si vendrán o no en son de paz, o los daños crecientes en las numerosas infraestructuras (gaseoductos, líneas férreas…) que se asientan sobre terrenos congelados y estables que pronto dejarán de estarlo.

UN PLANETA SIN HIELOS

La verdad es que para 2050, si he logrado sobrevivir, habrá pasado un siglo justo desde mi nacimiento; demasiado para un ser humano, pero apenas un soplo en el devenir de nuestro planeta. Un siglo en el que se ha concentrado todo lo que soy y he vivido, lo que he amado, los amigos con los que he compartido la vida, las montañas que he escalado y los desiertos que he atravesado caminando. En este corto espacio de tiempo, en términos geológicos, he visto cómo iban desapareciendo los glaciares de los Pirineos. Y para 2050 los paisajes de los grandes hielos del planeta estarán en vías de extinción. Después de los Pirineos llegarán los Alpes, donde ya hoy se puede percibir la velocidad con la que menguan sus glaciares. Igual que en Groenlandia y, en general, en todo el Ártico. Para esas fechas el calentamiento estará afectando de forma severa a las montañas del Himalaya y las del Karakórum, que vienen a ser el frigorífico de las grandes montañas. Tras ellas solo quedará la Antártida, cuya importancia en el clima y las corrientes marinas es posible que signifique la puntilla a la supervivencia de la especie

humana.

Ya hoy vemos las consecuencias de todos esos catastróficos acontecimientos, cuyos primeros perjudicados serán las poblaciones más pobres de esas montañas, que necesitan esas aguas para alimentarse y regar sus campos. Al tiempo, algunas lagunas glaciares reventarán sus diques por fenómenos naturales frecuentes como los terremotos. Y se resentirán los recursos hídricos de grandes poblaciones de Asia. Al mismo tiempo, los nativos situados en los márgenes de desiertos como el Taklamakán, Sáhara o Atacama, habrán iniciado una huida hacia otros lugares. Pero la Tierra no está en peligro. Solo estaremos en peligros nosotros, nuestros hijos, nuestros nietos, pues, como dijeron Stephan Hawking y Carl Sagan, apenas somos una especie de monos avanzada, que habitamos un pequeño planeta en las orillas del océano cósmico.

SEBASTIÁN ÁLVARO

Montañero, aventurero y escritor

El calentamiento ha alcanzado un punto crítico en el Ártico. Allí la liberación a la atmósfera de CO2 que tiene lugar durante los inviernos ha dejado de estar compensada por lo que absorbe la vegetación cuando llega la primavera y el verano. Con los datos más recientes a mano, los suelos del Ártico están aportando anualmente 700 millones de toneladas de CO2, por lo que se han convertido en una fuente adicional de gases de efecto invernadero, contribuyendo a reforzar el calentamiento global. Las implicaciones que puede tener una fusión masiva de permafrost están promoviendo cada vez más estudios de campo sobre las emisiones netas en aquella vasta y cada vez menos fría región del planeta. Por ejemplo, se ha descubierto que las bacterias al desperezarse de su gélido letargo desactivan la capacidad de retener carbono por parte del hierro contenido en los suelos. Hallazgos así obligan continuamente a los científicos a recalcular sus proyecciones climáticas.

La pérdida de permafrost implica una liberación de enormes cantidades de carbono a la atmósfera, lo que podría restar eficacia a las medidas de mitigación que vayamos poniendo en marcha para tratar de frenar el calentamiento global. A esa pérdida también están contribuyendo los pavorosos incendios que se están produciendo los últimos años en Siberia y en otras zonas del Ártico, favorecidos por los episodios de altas temperaturas a los que ya hemos hecho referencia. El año 2020 marcó un punto de inflexión en amplias zonas de Siberia. Durante bastantes meses se alcanzaron anomalías cálidas de +6 °C (seis grados Celsius por encima de la media), habiendo días en que dichas anomalías fueron de hasta +20 °C, como cuando se alcanzaron los 38 °C en Verjoyansk (dato que comentamos en el anterior capítulo). Estamos viendo con nuestros propios ojos lo que las proyecciones climáticas nos indican que pasaría allí a finales de siglo. Con un calentamiento de semejante magnitud y tan acelerado en Siberia, sus consecuencias son imprevisibles.

Pero volvamos con los incendios. Su mayor frecuencia y magnitud está empezando a transformar radicalmente el paisaje ártico continental, provocando el colapso abrupto de grandes extensiones de permafrost. La señal que delata el rastro de un incendio por aquellas tierras boreales es la presencia de lo que los expertos denominan termokarst. Es el tipo de terreno al que evoluciona el permafrost una vez que se quema. En un reciente estudio llevado a cabo en Alaska se concluyó que la formación de termokarst se ha acelerado allí un 60 % desde la década de 1950 hasta nuestros días.

Parece claro que el calentamiento global está proporcionando condiciones cada vez más favorables para la formación de incendios, los cuales, a su vez, degradan el permafrost y también queman las turberas. Estos terrenos empapados y esponjosos, formados por grandes cantidades de materia orgánica, se están secando en su parte superficial debido a las altas temperaturas reinantes durante períodos de tiempo cada vez mayores. Dicha circunstancia las convierte en un material seco muy inflamable, que al igual que el permafrost está siendo pasto de las llamas, con la consiguiente liberación de carbono a la atmósfera.

El permafrost despierta cada vez más interés entre los

investigadores del clima por las consecuencias que puede tener su elevado ritmo de fusión, pero no podemos olvidarnos de otros hechos extraordinarios que están ocurriendo en el Ártico y que también son motivo de estudio. Seguro que ha oído hablar últimamente de los calentamientos súbitos estratosféricos (CSE). Se trata de subidas rápidas y notables de la temperatura en una amplia región de la estratosfera polar. Los CSE están casi exclusivamente documentados en el Ártico en invierno (se produce uno cada dos años, de media, aunque los episodios de mayor magnitud se distancian algo más en el tiempo). El término «calentamiento» no debe llevarnos a engaño. En la estratosfera no llega a hacer calor como tal; son tan bajas las temperaturas allí reinantes que cuando se produce un CSE, el aire sigue estando muy frío (entre -20 y -30 °C), aunque mucho menos que en condiciones normales.

Para entender la razón de ser de un CSE necesitamos conocer un par de conceptos de dinámica atmosférica: el vórtice polar y las ondas de Rossby, lo que nos lleva de nuevo al chorro polar, sobre el que ahora volveremos. El Ártico es una de las dos grandes fábricas de aire frío de la Tierra (la otra es la Antártida). La rotación terrestre hace que esa gran masa de aire frío forme un gigantesco vórtice alrededor del Polo Norte, que se manifiesta tanto en la troposfera como en la estratosfera. Las diferentes propiedades de este par de capas atmosféricas, con una importante discontinuidad entre ellas (la tropopausa), hacen que podamos distinguir entre un vórtice polar inferior (troposférico) y otro superior (estratosférico), conectados entre sí, aunque cada uno con sus particularidades.

En verano, la fábrica produce menos frío y el vórtice (considerémoslo ahora como un único elemento) queda bastante más ceñido al casquete polar ártico. Aunque presenta sus características ondulaciones, estas no suelen ser muy pronunciadas, siendo raras las incursiones de aire polar por debajo de la latitud 40-45º N. En invierno, por el contrario, la producción de la fábrica del frío es máxima. El vórtice polar estratosférico se fortalece y el troposférico se expande hacia el sur y ondula, a veces mucho, lo que en latitudes medias se traduce en una alternancia de vaguadas y dorsales, descolgándose ocasionalmente danas.

Esas grandes ondas planetarias (hemisféricas), que marcan la

posición por donde discurre el chorro polar, se conocen como ondas de Rossby, llamadas así en honor al meteorólogo estadounidense, de origen sueco, Carl-Gustaf A. Rossby (1898-1957), que las dedujo teóricamente como solución al problema de la circulación del aire en esa franja terrestre. Cuando el aire que confinan los dos vórtices polares es muy frío, ambos están en «modo estable»; el chorro polar no presenta grandes ondulaciones, se intensifica, y la circulación atmosférica es principalmente zonal (según los paralelos terrestres). Sin embargo, cuando el frío polar se debilita, los vórtices entran en «modo inestable», el troposférico (y la corriente en chorro que lo delimita) se ondula mucho y pasa a dominar una circulación meridiana.

En la última configuración descrita, en latitudes medias alternan las incursiones de aire frío en sentido N-S (profundas vaguadas), con las de aire cálido (subtropical) en sentido S-N (dorsales muy elongadas). En este último modo, ocurre, en ocasiones, que ese aire cálido logra transferirse de la troposfera a la estratosfera en la zona polar, produciéndose el CSE. Esta importante anomalía térmica tiene como principal consecuencia la inestabilización del núcleo de aire frío del vórtice polar estratosférico. Su configuración cambia, pudiendo llegar a fragmentarse. Llegados a este punto, la evolución posterior puede seguir distintos caminos.

Es justamente a partir de ese punto donde entramos en el terreno especulativo y donde —con el nivel de conocimientos actuales— no se puede ser categórico. El CSE no siempre termina provocando cambios significativos en la circulación atmosférica troposférica, devolviéndole la pelota (metafóricamente hablando) al vórtice polar de los niveles bajos. Ocurre algunas veces, pero no siempre. Los CSE de mayor magnitud sí que suelen terminar transmitiéndose a la baja atmósfera (en un proceso evolutivo que dura varias semanas), dando lugar a un chorro muy ondulado y favoreciéndose, además, que los grandes sistemas de presión tiendan a ser estacionarios. En el Atlántico Norte se establece una situación de bloqueo, produciéndose importantes desalojos de aire frío, tanto en Norteamérica, como en parte de Europa.

La magnitud que está teniendo el calentamiento global en el Ártico, con episodios de temperaturas anómalamente altas cada vez más

frecuentes, invita a pensar en una tendencia a aumentar los CSE de gran magnitud, con los consiguientes cambios en la dinámica atmosférica en latitudes medias. El problema es que el comportamiento de la atmósfera es más complejo que esa simplificación que hemos hecho, reduciendo todo al acoplamiento e interacción de los dos vórtices polares y a los distintos modos ondulatorios resultantes. Hay que profundizar más en el conocimiento de la interacción troposfera-estratosfera y de qué forma está influyendo en ella el cambio climático, si es que ya lo está haciendo. Todo apunta a que sí.

Los datos meteorológicos que se están registrando en la actualidad en el Ártico —alguno de los cuales ya hemos comentado— quedan fuera de los límites de la variabilidad de las décadas pasadas, conocidas gracias, principalmente, a los satélites de observación terrestre que empezaron a monitorizar las regiones polares con regularidad en el año 1979. Todo apunta a que la dinámica atmosférica en la región ártica no se parece ni parecerá a la que conocíamos hasta ahora. Está comenzando una época en la que el clima del Ártico empieza a ser distinto, más extremo, con olas de calor y episodios de lluvias (no solo nevadas) intensas, en el que no se descartan las «sorpresas climáticas», con implicaciones en el clima global. A ellas dedicaremos la última parte del libro.

GROENLANDIA Y LA ANTÁRTIDA BAJO LUPA

Todavía no abandonamos el Ártico. Vayámonos ahora a una gigantesca isla donde allá por el siglo X llegó un conocido vikingo y la bautizó como «tierra verde». Lo hizo como reclamo para atraer a colonos islandeses. Llegaron y se establecieran allí. Al igual que ocurre hoy en día, estaba en su mayor parte cubierta de hielo, aunque abundaban más los pastos en las franjas costeras que ocuparon. Como ya habrá adivinado, se trata de Groenlandia. Junto a la Antártida (a la que también dedicaremos varias páginas de este capítulo) es una de las regiones de la Tierra que más hielo acumula, con mantos que en algunas zonas llegan a superar los tres kilómetros de espesor. Tanto Groenlandia como la Antártida son centinelas del cambio climático. Las consecuencias de lo que vaya aconteciendo allí se irán notando en la evolución futura del clima. La magnitud de algunos impactos, como los provocados por la subida del nivel del mar, dependerá en gran medida de la cantidad de hielo que pierdan esos mantos. Con los datos en la mano, la fusión se está acelerando.

Desde hace tiempo, Groenlandia está en el punto de mira de los científicos por las implicaciones que puede tener en el sistema climático la pérdida masiva de hielo que está teniendo lugar allí. La isla tiene una superficie de 1,7 millones de kilómetros cuadrados y está cubierta por el grueso manto helado casi en su totalidad. La tasa actual de deshielo está obligando a revisar al alza su contribución a la subida del nivel del mar en los modelos climáticos. En el AR6 se ha aumentado casi al doble la contribución a dicha subida en 2100 debida a la pérdida de hielo groenlandés. En el anterior Informe (AR5), publicado en 2014, se estimó que era un 60 % menor. A medida que vaya avanzando el presente siglo, las aportaciones de agua del deshielo, tanto de Groenlandia como de la Antártida y de los glaciares del resto del mundo, pasarán a ser el principal factor que contribuya al ascenso del nivel marino, desbancando a la expansión térmica del agua, que es actualmente el factor dominante.

La ciudadanía debe exigir a sus gobernantes que escuchen a los científicos, que sean más proactivos y diligentes a la hora de ejecutar los acuerdos que firman a nivel internacional, que no teman la toma de decisiones impopulares de cara a una transición energética y climática, pues el reloj corre en nuestra contra. En la última cumbre internacional sobre el cambio climático, la COP26, que se celebró en la ciudad escocesa de Glasgow, su presidente, Alok Sharma, rompió a llorar y se excusó ante la opinión pública por la suavización de las ambiciones en el acuerdo del clima. Desilusionante e inadmisible.

ENRIQUE COPERÍAS

Periodista científico y escritor. Director de Muy Interesante entre 2015 y 2022

Todos los años, el servicio danés que se encarga de monitorizar el hielo de Groenlandia elabora su preceptivo informe. En el de 2021 se certificó la sucesión de 25 años seguidos (un cuarto de siglo) en los que se perdió masa glaciar. En términos de «balance de masa total» (suma de la fusión de la superficie, la pérdida de hielo de los icebergs que se desgajan y el derretimiento de las lenguas de los glaciares en contacto con el agua de mar) la capa de hielo perdió alrededor de 166.000 millones de toneladas entre agosto de 2020 y de 2021. Aunque nos parezca una cantidad muy grande (ciertamente lo es), quedó por debajo del valor de la pérdida neta anual media en el período 1981-2020.

Otro dato que incluye el informe y que saltó a los medios es que fue la primera vez que se registró lluvia en la estación meteorológica Summit, localizada en la cúspide de un glaciar a 3.200 metros de altitud. Las nevadas invernales estuvieron cerca del promedio para el período de referencia citado con anterioridad, hecho que no ocurrió en 2019; cuando la combinación de pocas nevadas invernales y un verano extremadamente cálido provocó un deshielo

sin precedentes. Solo aquel verano Groenlandia perdió más del doble de hielo que pierde en promedio cada año desde principios de siglo. Tal y como se ha comentado, estos episodios de temperaturas anómalamente altas son cada vez más frecuentes en las regiones árticas y subárticas: desde Siberia hasta Alaska, desde Canadá hasta Escandinavia y también en Groenlandia.

Las nevadas que tienen lugar sobre suelo (hielo) groenlandés, aunque a veces son importantes, ya no llegan a compensar el deshielo que está teniendo lugar allí, y los consiguientes aportes de agua dulce al océano Atlántico. Si hace algunos años el manto de hielo se mantenía más o menos estable, con unas pérdidas en verano que se compensaban con la ganancia de nieve invernal, en el último lustro se ha roto ese equilibrio y la fusión de hielo ha aumentado significativamente, sin que haya indicios de que ese proceso vaya a detenerse a corto-medio plazo.

Procesos naturales como el deshielo estacional que tiene lugar cada año en vastas regiones cubiertas de nieve y hielo de ambos hemisferios se están viendo claramente alterados. La criosfera se está reduciendo significativamente, lo que tiene sus implicaciones en el sistema climático. Volviendo al verano de 2019, se hizo viral una fotografía de unos trineos empujados por perros cruzando una extensa laguna de aguas someras en Groenlandia. La imagen generó controversia, ya que no faltaron las voces críticas diciendo que esa pérdida de hielo ocurre allí todos los veranos. Es cierto que el deshielo estival no es novedad, pero sí lo es la magnitud que está alcanzando, hasta el punto de estar cambiando la fisionomía de las regiones tradicionalmente frías de la Tierra.

La red de arroyos, ríos y lagos de deshielo en Groenlandia y otras zonas del Ártico y también de la Antártida es cada vez más extensa, desplazando cada vez más agua líquida sobre la superficie blanca de un hielo cada vez más horadado, lo que aumenta su fragilidad. Algo parecido está ocurriendo en los glaciares de montaña, cuyo retroceso viene acompañado de la formación de lagos y lagunas, en número creciente, que suponen una amenaza para las poblaciones locales situadas aguas abajo.

El deshielo de Groenlandia está provocando que se formen allí todos los veranos muchos agujeros en la gruesa capa helada, por

donde se precipitan torrentes de agua. El manto de hielo se parece cada vez más a un queso de gruyere. Cada verano que pasa estamos viendo cómo se forman allí más de esos boquetes, aparte de una tupida red de ríos y arroyos de deshielo. Parte del agua que desplazan termina cayendo en esos agujeros que van socavando la gruesa capa de hielo, conocidos como molinos glaciares. Muchos científicos piensan que cuanto más profundos sean esos boquetes, con más presión llega abajo el agua que se precipita en ellos, penetrando por grietas hasta la misma base de esa capa de hielo, favoreciendo su deslizamiento y que esas inmensas moles de hielo glaciar se desplacen más rápido hacia el mar, lo que puede acelerar todavía más la pérdida del hielo groenlandés.

En una campaña científica llevada a cabo hace unos años se pudo comprobar cómo el agua al precipitarse por una de esas enormes grietas genera calor, de manera parecida a lo que ocurre con el salto de agua en la presa de una central hidroeléctrica. Ese calor interno contribuye todavía más a la fusión del hielo y al efecto lubrificante antes apuntado, con la consiguiente pérdida de estabilidad del manto helado. Todo ello se traduce en unos aportes de agua dulce al Atlántico Norte procedentes de Groenlandia cada vez mayores, lo que comienza a alterar las corrientes marinas y, como veremos en el último capítulo, puede depararnos alguna sorpresa climática.

Cambiemos ahora de hemisferio y demos un salto hasta la Antártida. En 2018 tuve la suerte de participar en la XXXI Campaña Antártica Española y estuve casi tres semanas en la base científica que España tiene en la isla Livingston, en el archipiélago de las Shetland del Sur. Al margen de la experiencia y los recuerdos imborrables que uno se trae de aquel lugar, la presencia de tanto hielo a tu alrededor enmascara los impactos que el calentamiento global está empezando a tener allí, puestos de manifiesto por un número cada vez mayor de investigaciones multidisciplinares.

Desde que empezó a hablarse del cambio climático hasta la actualidad, la Antártida ha ido adquiriendo cada vez un papel más relevante, en la medida en que nuestro conocimiento científico de todo lo que allí acontece es cada vez mayor. Cuando las señales del calentamiento global empezaron a dispararse por todo el mundo y entramos en la zona roja, el aislado continente blanco parecía ajeno

a ellas. Tan solo en la península antártica se detectaba una respuesta inequívoca al forzamiento climático. La rotura de algunas plataformas de hielo y su deambular por el mar de Weddell despertaron el interés mediático, al margen de la destrucción de ozono estratosférico y el famoso «agujero», que fue durante muchos años el principal asunto que generaba noticias sobre la Antártida. Con el paso del tiempo las cosas fueron cambiando y, hoy en día, de lo que más se habla es de los signos, cada vez más evidentes, del calentamiento global allí y de sus posibles consecuencias a escala global.

DESDE LA ANTÁRTIDA A LOS JÓVENES DEL MUNDO

¿Has visto el cambio climático…? Es la pregunta del millón, la que más me han hecho cuando vuelvo de las expediciones a la Antártida, y dar una respuesta no es una tarea sencilla. Es difícil ver un fenómeno que es invisible, pero no por eso debemos subestimar sus efectos, que llegan hasta este rincón del planeta aislado y deshabitado, pero que sufre las consecuencias del cambio climático que se genera por la acción del hombre. Aun así, me alegra que me hagan esta pregunta, me sirve de barómetro personal para saber que mi entorno está preocupado, como lo están los jóvenes de todo el mundo. Es lo que les hace salir a las calles, de la misma manera que en los años 60, cuando se luchaba por la democracia y los derechos civiles. La juventud venció. Ahora también lo tienen que conseguir.

Pasando unas pocas semanas en la Antártida durante cada expedición no puedo decir que veo el cambio climático, como tampoco puedo ver el agujero de la capa de ozono, y está ahí. Lo que sí puedo es estudiar cómo, con el cambio climático, los ecosistemas antárticos quedan expuestos a la llegada de especies invasoras de otras latitudes que los pueden alterar hasta puntos que desconocemos. Así, investigando, los que ya dejamos de ser jóvenes podemos ayudarles para que salven su mundo en 2050.

ANA JUSTEL

Catedrática de Estadística e investigadora polar

Llama la atención la asimetría observada entre el comportamiento de la temperatura en la Antártida Occidental, donde la subida es particularmente acusada, y en la Oriental, donde dicho ascenso está muy atenuado siendo incluso inexistente en algunas zonas. Mientras estaba escribiendo este libro salió publicado un artículo en la revista Science Advances, en el que sus autores —unos científicos surcoreanos— llegan a la conclusión de que variabilidad climática natural ha estado camuflando la señal del calentamiento global en la Antártida Oriental. Por el contrario, la retroalimentación positiva de la temperatura debida a la importante pérdida de hielo que está teniendo lugar en las plataformas de la Antártida Occidental hace que allí el calentamiento se manifieste de forma clara. En los próximos años/décadas dicha circunstancia también ocurrirá en la Antártida Oriental, en la medida en que sus plataformas de hielo comiencen a colapsar.

De manera simplista podemos pensar que el hielo de una plataforma de hielo antártica o de un glaciar de montaña disminuye en respuesta a la subida de la temperatura, pero la cosa es más compleja. Son varios los factores que intervienen en el balance de masa. El que un año nieve por encima o por debajo de la media en la cabecera de un glaciar compensa de diferente manera las pérdidas o ganancias que se produzcan por el factor temperatura o por otros factores también a considerar.

Cuando unos científicos británicos analizaron en detalle las aportaciones de los distintos factores a la fusión superficial de la plataforma Larsen C, en la península Antártica, descubrieron que el que más ha influido en la pérdida de hielo observada ha sido la insolación, seguido del efecto foehn, provocado por los vientos cálidos y secos que soplan, a veces, a sotavento de las montañas que vertebran la citada península y del tipo de nubosidad dominante.

Los cambios en las corrientes oceánicas que discurren alrededor del continente blanco también están influyendo en la pérdida de hielo

de la Antártida Occidental. Las incursiones de aguas menos frías que antaño por debajo de las plataformas contribuyen a horadarlas más, con lo que pierden estabilidad y favorecen la aparición de fracturas, de las que se desprenden a veces grandes icebergs tabulares. Aparte de eso, la gigantesca corriente Circumpolar Antártica, de agua muy fría, que rodea el continente blanco se está acelerando, volviéndose cada vez más veloz. La causa parece residir en los cambios que se están produciendo en el gradiente térmico entre la Antártida y la periferia (al norte del paralelo 60º S). En la medida en que el calentamiento global aumente, la velocidad de la corriente también lo hará, lo que tendrá consecuencias en la propia dinámica atmosférica alrededor del continente blanco y podrá afectar en el futuro a la logística de las campañas antárticas.

A la pérdida de hielo de Groenlandia y la Antártida (en ambos casos en clara curva ascendente, superando la primera a la segunda) se suma la de la mayoría de los glaciares de montaña de la Tierra. Su retroceso se inició al finalizar la Pequeña Edad del Hielo (cuyos últimos coletazos tuvieron lugar a finales del siglo XIX), pero ha sido a partir de la década de 1980 cuando el proceso de fusión se ha acelerado de forma vertiginosa. Dicha circunstancia pone en riesgo la supervivencia de muchos millones de personas en el mundo, cuya principal fuente de abastecimiento de agua dulce proviene de los glaciares, aparte de los problemas de las inundaciones catastróficas que provoca el desbordamiento de los lagos de deshielo.

En lo que llevamos de siglo XXI los glaciares de la Tierra han perdido, en promedio, unas 267 gigatoneladas de hielo al año, lo que ha contribuido al 21 % del ascenso del nivel del mar experimentado en dicho período. El calentamiento global se está cebando particularmente con los glaciares del Himalaya. Tan solo en el Estado de Sikkin, en el norte de la India y lindando con el Reino de Bután, se han formado ochenta y cinco lagos naturales entre 2003 y 2010, lo que está cambiando de forma acelerada la geomorfología de la zona. Muchos de esos y otros lagos de fusión quedan retenidos por barreras formadas por las rocas sueltas y la tierra que acumulan las morrenas de los glaciares. A medida que los lagos crecen, aumenta la presión del agua, esas presas naturales ceden y se producen violentas riadas aguas abajo. Si la subida de las temperaturas sigue su curso, el número de estos lagos y lagunas

glaciares seguirá creciendo y también lo hará, en consecuencia, el riesgo de desbordamiento, aparte de los problemas de abastecimiento de agua potable ligados a la pérdida de hielo.

Me asalta la duda de si seremos capaces de influir suficientemente los humanos en la evolución del clima, frenando el calentamiento global, emitiendo menos gases y cuidando nuestros mares. Me intriga. Pero ante la duda, mejor será actuar con más mimo y contundencia. Ecología, sostenibilidad, desperdicio alimentario… se deben convertir en nuestra obsesión.

PEDRO SUBIJANA

Cocinero. Restaurante Akelarre

Las proyecciones climáticas incorporan para cada uno de los escenarios de emisiones considerados (cinco en el Sexto Informe del IPCC, como veremos en el capítulo 5) las distintas aportaciones de la fusión de hielo groenlandés, antártico y de los glaciares de montaña a la subida global del nivel del mar a final de siglo. Cuando se ofrece el dato de dicha subida a escala global, es un promedio para todos los mares y océanos terrestres, habiendo regiones donde el nivel marino sube y otras donde baja.

A partir de todos los datos de satélite disponibles sabemos que desde principios de los años 90 hasta la actualidad el nivel del mar está subiendo, en promedio para toda la Tierra, algo más de 3 mm al año, detectándose, además un incremento en la tasa de crecimiento en los últimos años con respecto a los primeros en que se tomaron medidas. El AR6 señala que «aumentó en 0,20 [0,15 a 0,25] m durante el período de 1901 a 2018, con una tasa de aumento que se ha acelerado desde la década de 1960 a 3,7 [3,2 a 4,2] mm año para el período 2006-2018 (confianza alta)».

Teniendo en cuenta un escenario de emisiones realista (intermedio),

en 2050 el nivel del mar subirá probablemente entre 25 y 30 centímetros por encima del nivel actual. Dicha subida es varias veces mayor que la experimentada en los últimos treinta años. La subida del nivel marino está tomando carrerilla, y aunque descarbonicemos el mundo en ese horizonte temporal de treinta años (algo que en el escenario bélico actual se ve todavía más inalcanzable) no podremos frenar en seco sus previsibles impactos. En la actualidad, cerca de 700 millones de personas viven en zonas costeras vulnerables y ese número aumentará significativamente de aquí a mediados de siglo.

OLAS DE CALOR MARINAS

La subida del nivel del mar de la que venimos hablando es una consecuencia del aumento del volumen que ocupan los océanos; lo que se debe en gran parte a la expansión térmica de unas aguas cada vez más cálidas. Dicha circunstancia es particularmente evidente en la superficie marina, justo donde la atmósfera y el océano intercambian masa, cantidad de movimiento y energía; esta última en forma de calor, mucho calor. Quédese con el siguiente dato: en los últimos veinticinco años los océanos han absorbido 228 sextillones (anglosajones) de julios de energía calorífica; o si prefiere 228.000.000.000.000.000.000.000 julios. Teniendo en cuenta que un julio puede definirse como la cantidad de energía necesaria para elevar 0,24 ˚C la temperatura de un gramo de agua, podemos hacernos una idea de la magnitud que está teniendo el calentamiento de los océanos en el último cuarto de siglo.

El ascenso de la temperatura del agua del mar no solo se detecta en la capa superficial oceánica, sino en los primeros dos mil metros de profundidad, incluso a mayores profundidades en algunas zonas, aunque apenas disponemos de datos tan abajo. A la vista de lo anterior, el calentamiento global ya no solo se manifiesta en la atmósfera, sino también en los mares y océanos, lo que está empezando a tener consecuencias tanto en la dinámica atmosférica como en la oceánica. Hasta ahora los océanos se habían limitado a absorber calor sin apenas subir su temperatura, pero eso está empezando a cambiar y a gran velocidad.

Las referencias a olas de calor ligadas al cambio climático son muy numerosas, tanto en la abundante bibliografía sobre el tema como en infinidad de informaciones publicadas en la prensa desde hace décadas. Dichos eventos atmosféricos hacen alusión a períodos de varios días (a veces semanas) de duración, en los que se alcanzan unas temperaturas significativamente más altas que las normales para la época del año y la región donde acontecen. En los últimos años, el concepto de ola de calor se ha extendido también al medio

marino. De forma análoga a lo que ocurre en la parte baja de la atmósfera, de vez en cuando se forman gigantescas balsas de agua (superficiales) en las que se producen anomalías positivas de temperatura muy destacadas, de hasta $+5$ y $+6\,^{\circ}\mathrm{C}$ en algunos casos estudiados, lo que tiene importantes consecuencias en los ecosistemas marinos (castigando duramente a los coralíferos).

Para ayudar a caracterizar la magnitud de las distintas olas de calor marinas, un grupo internacional de trabajo estableció en 2018 un sistema de nomenclatura de las mismas, así como una clasificación por categorías —de I a IV— en función del rango que alcanzan las anomalías positivas de temperatura. La categoría I se asigna a los eventos moderados, la II a los fuertes, la III a los severos y la IV a los extremos. La caracterización de los mismos se completa con otros aspectos, como la mayor o menor rapidez con la que se inician, así como su duración. Todo ello permite llevar a cabo un análisis comparativo de distintas olas de calor marinas en base a criterios comunes y homogéneos.

Aunque el estudio en detalle de las olas de calor marinas es reciente, ya se dispone de información suficiente para establecer tendencias en su comportamiento, conocer algunas claves sobre su formación y los impactos que provocan. Estos eventos, cuya persistencia puede variar de unas pocas semanas hasta varios meses, son cada vez más duraderos y se constata también un aumento en su frecuencia. Si comparamos el período 1925-1954 con el 1987-2016, el número anual de días de olas de calor marinas, en promedio para toda la superficie oceánica, ha aumentado en un 50 %.

Durante 2019, en el 41 % de la superficie oceánica se produjo en algún momento un evento clasificado como fuerte (categoría II), frente al 29 % donde no se registró un evento mayor que moderado. Otro dato revelador es que en el citado año se experimentó al menos una de esas olas de calor marinas en el 84 % de la superficie de los mares y océanos. Al igual que está ocurriendo con las olas de calor atmosféricas, las marinas van a más, lo que hará que, previsiblemente, aumenten sus impactos. Algunas de las olas de calor marinas estudiadas parecen inducir cambios en patrones meteorológicos que alteran la circulación atmosférica a escala

regional, con las repercusiones que ello conlleva en zonas continentales próximas.

Tomando como período de referencia el 1982-2016, uno de los primeros casos estudiados fue el ocurrido en el Mediterráneo noroccidental en 2003 (el año de la histórica ola de calor ocurrida aquel verano en Europa). El agua superficial alcanzó temperaturas de entre 3 y 5 °C por encima de la media, durante cerca de un mes. Otro importante episodio que se ha estudiado es el de la costa oeste de Australia de 2011. La magnitud del calentamiento de las aguas superficiales fue similar a la de la ola de calor marina del Mediterráneo de 2003, destacando las diez semanas (¡casi tres meses!) que se mantuvo la anomalía térmica positiva. Contribuyó a ella el evento de La Niña ocurrido en aquellas fechas.

Pero si hay una región oceánica que destaca por la magnitud y frecuencia de sus olas de calor marinas, esa es el nordeste del Pacífico, con varios episodios bien documentados entre 2013 y 2019. El mayor de todos ellos ocurrió entre los años 2013 y 2015, fue bautizado como The Blob («La gota») y en él se alcanzaron anomalías de temperatura de +6 °C. Su impacto en varias especies marinas, así como en aves, fue muy grande.

Nuestro conocimiento sobre las causas por las que, en un momento dado, se forma en una región oceánica una gran balsa de agua superficial con una temperatura de varios grados por encima de la media, para, transcurrido un tiempo, desaparecer dicha anomalía es limitado, aunque van surgiendo estudios que arrojan algo de luz al asunto. Uno de los factores que parece ser clave en el surgimiento de las olas de calor marinas es el grosor de la capa superficial oceánica, que puede oscilar entre los 20 y los 200 metros, y cuya principal característica es que en toda ella la temperatura del agua se mantiene aproximadamente constante.

Si dicha capa es lo bastante gruesa actúa como un amortiguador térmico, pero cuando es más delgada su tiempo de respuesta a un forzamiento térmico atmosférico es mucho más rápida, viéndose sometida con mucha más facilidad a las oscilaciones de temperatura. Se ha podido comprobar que la capa superficial oceánica está adelgazando, lo que facilita su calentamiento y la formación de las olas de calor marinas. Ese adelgazamiento,

previsiblemente, irá a más a lo largo del presente siglo, lo que se traducirá en episodios más frecuentes y eso irremediablemente conllevará impactos, con los vulnerables corales en el punto de mira.

El calentamiento de las aguas hace que los corales expulsen microalgas, volviéndose blanquecinos. Si ese proceso es duradero culmina con la muerte del coral. En los últimos años estamos viendo cada vez con mayor frecuencia episodios masivos de decoloración de los corales. No todo son malas noticias, ya que algunos arrecifes de coral, como los de la Gran Barrera de Australia, tienen una gran capacidad de reponerse al blanqueamiento. En el caso particular de los corales del Mediterráneo, el impacto de las olas de calor que periódicamente afectan a ese mar está siendo devastador para algunas especies como las gorgonias, llegando a documentarse reducciones superiores al 90 % en algunas zonas. Tras los episodios de calor extremo de 2009, 2016, 2017, 2018 y 2021, las elevadas tasas de mortalidad impidieron la recuperación de las colonias que ya estaban tocadas de eventos anteriores. El asunto pinta mal, sin duda.

IV.

UN FENÓMENO GLOBAL CADA VEZ MÁS LOCAL

Redundando en la idea que ya expuse en el prefacio, el cambio climático es cada vez más tangible; lo percibimos como algo cada vez más cercano. Ya no podemos escudarnos en que no va con nosotros. Sus impactos se perciben a todas las escalas: la global, la regional y la local. De todos ellos, los episodios de calor extremo y los períodos con temperaturas anómalamente altas para la época del año son, seguramente, los hechos que con una mayor frecuencia se repiten, afectándonos de forma reiterada. En este capítulo se expondrán varios ejemplos, algunos de los cuales puede que haya vivido en primera persona o le recordará a alguna vivencia reciente que ha tenido.

Paralelamente a la magnitud que está alcanzando el calentamiento global, el clima se está volviendo más extremo, lo que se manifiesta de múltiples formas. La acumulación de calor tanto en la baja atmósfera como en la parte superficial de los océanos aporta una energía extra que termina manifestándose en la extremosidad meteorológica observada; desde llamativas intensidades de precipitación y vientos de gran violencia, hasta bruscos vaivenes en las temperaturas, que nos descolocan tanto a nosotros como al resto de formas vivas del planeta. Aunque en el marco del calentamiento global las altas temperaturas dominan la escena, irrumpen también algunos episodios de signo contrario, también extremos, que nos pillan cada vez más desprevenidos por constituir la excepción a la regla. En España tenemos el ejemplo reciente de la gran nevada y ola de frío posterior que aconteció en enero de 2021, al paso de la borrasca Filomena, al que dedicaremos unas líneas.

LA NUEVA CONVERSACIÓN DE ASCENSOR

Algo ha cambiado en las conversaciones de ascensor, iniciadas por alguno de los interlocutores para romper el incómodo silencio que se da en ciertas ocasiones, cuando se encuentran dos o más personas desconocidas en un espacio reducido, como el citado ascensor, la sala de espera de un hospital o los asientos contiguos de un tren o un avión. Hoy en día, nos refugiamos en nuestro teléfono móvil para aislarnos del mundo exterior, lo que, ciertamente, no ayuda a iniciar ese tipo de conversaciones banales y espontáneas, aunque siguen produciéndose, y en ellas el tiempo reinante es el tema estrella, aunque esto también está cambiando; no tanto el asunto como el discurso.

Aunque en las encuestas son muchos los ciudadanos que dicen sentirse preocupados por el cambio climático, son pocos quienes están dispuestos a cambiar sus hábitos de vida; por ejemplo, utilizando el tren en lugar del avión siempre que sea posible. En teoría, la mejor solución —como en tantos otros problemas— sería mejorar radicalmente la calidad de la educación a nivel global. Pero no tenemos tiempo para eso. Quizá el único remedio sea una gigantesca campaña de comunicación para sensibilizar a los ciudadanos de todo el mundo y poner a gran parte de ellos en actitud de protesta firme contra sus Gobiernos. ¿Quedarán suficientes Homo sapiens capaces de hacerlo?

LEONTXO GARCÍA

Periodista especializado en ajedrez

El hecho de que el clima se esté volviendo cada vez más extremo

está dando lugar a un número creciente de fenómenos meteorológicos adversos, lo que aumenta la probabilidad de que nos afecten de forma más o menos directa y, en consecuencia, hablemos con relativa frecuencia de ello. Cada vez vivimos más veces en primera persona hechos que resultan más difíciles de desvincular del cambio climático. Como además hemos ido construyendo una sociedad global interconectada, los impactos del cambio climático en una región del mundo alejada de la nuestra termina afectándonos, a veces de forma insospechada.

Se me ocurren multitud de ejemplos que sirven para ilustrar lo anterior. La misma globalización que nos permite comprar un determinado producto (de una amplísima oferta de ellos) cómodamente a través de nuestro móvil u ordenador y recibirlo al día siguiente o a los pocos días en nuestra casa puede propiciar una reacción en cadena ante una contingencia con la firma del clima, que repercuta negativamente en nosotros, principalmente en nuestro bolsillo. Las materias primas (de cualquier índole) no se distribuyen de forma uniforme por toda la Tierra. Algunas de ellas se concentran en determinadas regiones del mundo que son particularmente vulnerables a los extremos climáticos.

Si pensamos en un producto básico de la alimentación mundial como el maíz, EE. UU. es su principal productor, con más de un 30 % del que se consume en el mundo, dominando las exportaciones mundiales de ese grano. El maíz estadounidense se cosecha en el llamado Granero de Norteamérica, localizado en su mayor parte en los Estados de Iowa, Missouri, Illinois, Indiana y Ohio, que localizamos al sur de los Grandes Lagos. Si en algún momento se produjera allí una sequía duradera y de gran magnitud (lo que encaja cada vez mejor en el escenario climático al que nos estamos dirigiendo), la reducción drástica que tendría lugar en la producción del maíz estadounidense repercutía en todo el mundo, encareciéndose ese cereal y otros muchos productos que de forma indirecta se generan gracias a él. Piense que el maíz es uno de los suplementos alimenticios que se da al ganado bovino.

Siguiendo con el ejemplo, podemos enunciar una nueva versión del efecto mariposa de la siguiente manera: «Los escarceos de una persistente sequía en el Granero de Norteamérica pueden disparar

por las nubes el precio de las hamburguesas». Lo cierto es que no es tan mala noticia, pensando en la reducción del consumo de carne que se demanda como medida de mitigación del cambio climático. Bromas aparte, la idea que quiero transmitirle es que nuestro mundo globalizado, si bien ha proporcionado a muchos millones de personas en todo el mundo un nivel de bienestar nunca antes conocido en la historia de la humanidad, tiene una fuerte dependencia del comportamiento del clima. La rapidez con la que está cambiando y volviéndose más extremo amenaza la estabilidad del complejo sistema interconectado sobre el que hemos ido construyendo nuestra sociedad tecnológica actual.

A esa hipotética, pero factible en cualquier momento, sequía en uno de los graneros del mundo, se ha sumado este año la guerra en Ucrania, que le recuerdo que es el cuarto país exportador de maíz del mundo. Ha entrado en escena un nuevo elemento desestabilizador, sin que de momento (mientras escribo estas líneas) pueda hacerse una predicción de cuál será la situación cuando este libro vea la luz y en los meses y años siguientes. El maíz fue el primer ejemplo que me vino a la cabeza, pero pude haber pensado muchos otros y en cualquiera de los casos habríamos llegado a la misma conclusión: nuestra dependencia de materias primas procedentes de todos los rincones del mundo en el contexto actual de cambio climático es una debilidad, que en un visto y no visto puede movernos de nuestra zona de confort.

Aunque el título del libro apunta hacia el futuro, a lo que podemos esperar del clima en los años venideros, con 2050 como horizonte donde fijar objetivos, en este capítulo seguiremos instalados en el presente, viviendo ya un cambio climático que cada vez se manifiesta de forma más aplastante y del que estamos tomando conciencia a la fuerza. Desde antaño, el tiempo ha sido tema de conversación. Lo es cuando acontece algún hecho o circunstancia meteorológica excepcional que nos afecta de lleno. Esto siempre ha ocurrido, no es algo nuevo. La novedad ahora reside sobre todo en la magnitud creciente de los episodios de calor y de los episodios hidrometeorológicos, viéndose cada vez más personas afectadas por ambas circunstancias. Ya no podemos esquivar el tema y esconder la cabeza bajo el suelo como el avestruz. Nos afecta y somos cada vez más conscientes de ello y más vulnerables. También nos

preocupa (un dato que avalan las encuestas), pero nos resistimos a cambiar muchos de nuestros hábitos de forma voluntaria. Hablo en general y en un país desarrollado como España.

A pesar de que hablamos cada vez más del cambio climático y somos conscientes del problema que nos viene encima, es importante que la toma de conciencia no decaiga, sino que se refuerce. En esto los medios de comunicación juegan un papel fundamental. Se ha abusado mucho del catastrofismo y se ha comprobado que eso es contraproducente. Al ciudadano hay que exponerle de la forma más clara y sencilla posible, sin licencias gratuitas ni manipulaciones deliberadas, lo que sabemos y lo que no sabemos del comportamiento del clima, tanto las certezas como las incertidumbres. En este sentido, el libro que tiene entre sus manos intenta cumplir esa misión.

Del cambio climático se pueden contar muchas cosas desde enfoques muy diferentes, pero el mensaje que tiene que llegar a cada habitante de este planeta (viva en el primer o el tercer mundo) es que el clima terrestre está cambiando, que lo está haciendo con rapidez y que va a influir en su vida, en su día a día, en su familia, en su actividad… si es que no lo está haciendo ya. Una vez dicho y entendido esto, cada uno de nosotros afrontará la acción climática a su manera, pero con naturalidad, sin histerismos ni extremismos, como una reacción humana basada en el raciocinio, en el sentido común y de autoprotección, no en la irracionalidad. Quizás todo esto le suene utópico, muy alejado del comportamiento habitual de nuestra especie, pero hay que confiar en que igual que llegamos a la luna con una tecnología «de juguete» podemos llegar a ese punto. Debemos hacerlo.

LA GLOBALIZACIÓN DEL CALOR EXTREMO

Si entendemos por calor extremo el provocado por unas temperaturas significativamente más altas que la media del lugar y la época del año en que acontecen, estamos asistiendo cada vez a más episodios en los que se alcanza dicho calor extremo, teniendo una magnitud creciente y afectando cada vez a más zonas de la Tierra. Si pensamos en temperaturas de entre 45 y 50 °C, nos vienen a la cabeza lugares como el corazón del Sáhara, el valle de la Muerte, en EE. UU., los países de Oriente Próximo o el sur de Europa cuando toca; sin embargo, las cosas están cambiando en los últimos años, paralelamente a la magnitud que está alcanzando el calentamiento global.

Las anomalías positivas de temperatura están a la orden del día, ganando la partida a las negativas. En algunos casos —cada vez más— están asociadas a unas temperaturas muy elevadas, que no solo se producen en lugares tradicionalmente calurosos en verano, sino también en otros donde, aunque pueda, ocasionalmente, hacer calor, no es lo habitual. Es lo que ocurre por encima del paralelo 45. Cada vez es más común que se alcancen temperaturas próximas o superiores a los 40 °C en lugares situados bastante al norte, como Escandinavia, Siberia o Canadá, aparte de otras muchas regiones de latitudes templadas, donde parece clara la tendencia al alza de este tipo de situaciones.

Ya hice referencia a los 38 °C que se alcanzaron en la localidad rusa norteña de Verjoyansk a principios del verano de 2020 (soy insistente con el dato, pero le reconozco que me impactó). Aquel año fue muy anómalamente cálido en amplias zonas de Siberia. Ese registro termométrico supuso un nuevo hito en la larga lista de ellos vinculados al calentamiento global. Estamos en 2022 y la cosa no ha quedado ahí. El año pasado, el calor extremo volvió a ser noticia en una región boreal ¡y de qué manera! La ola de calor ocurrida a finales de junio de 2021 en el oeste de Canadá y zonas aledañas del noroeste de los EE. UU. superó cualquier previsión. Se alcanzaron

temperaturas máximas de entre 45 y 49 °C, rozándose casi los 50 (49,6 °C) en la pequeña localidad canadiense de Lytton, arrasada por el fuego de los incendios forestales que se desataron en la zona.

Los medios de comunicación emplearon la expresión «domo de calor» (o su equivalente «bóveda» o «cúpula térmica») para referirse a esa excepcional ola de calor. Es la forma usada por los meteorólogos norteamericanos para describir la masa de aire muy cálido, asociada a un sistema de altas presiones estacionario en la zona, dando como resultado unas temperaturas entre 10 y 15 grados más altas de las normales los días calurosos en aquella región. Entre los factores que favorecieron dicha situación estuvieron la prolongada sequía que desde hacía muchos meses afectó extensas zonas del oeste de los EE. UU. (en California comienza a ser prácticamente endémica) y una destacada anomalía cálida en las aguas superficiales del Pacífico nororiental, con un nuevo surgimiento de «la gota» (The Blob) a la que me referí en capítulo anterior.

En tiempo récord (poco más de una semana después de que «ardiera» —literal y metafóricamente— la Columbia Británica, un grupo internacional de expertos llevó a cabo un estudio de atribución de cambio climático, a partir de los registros climatológicos disponibles, concluyendo que la ola de calor sufrida en Canadá y EE. UU. es «virtualmente imposible» sin la influencia del cambio climático. En el marco del calentamiento global actual, es al menos ciento cincuenta veces más probable que se produzca una ola de calor de esas características (tanto su magnitud como la región terrestre donde ha tenido lugar) que si no hubiéramos influido en el clima como lo hemos hecho hasta la fecha.

El episodio de calor extremo de mayor magnitud ocurrido poco antes de entregar este libro a la editorial ha tenido lugar la primavera de 2022 en la India y Pakistán. Allí, los meses de abril y mayo, previos a la llegada del período de lluvias monzónicas, son calurosos, pero lo ocurrido en esta ocasión ha superado todo lo que conocíamos hasta ahora, tanto por los valores de temperatura alcanzados (entre 45 y 50 °C en un vasto territorio con una elevada densidad de población) como por su extraordinaria persistencia. No le voy a marear con datos. Podría hacerlo. Quédese solo con uno: en

la localidad pakistaní de Jacobabad, de unos 200.000 habitantes, durante más de un mes seguido la temperatura máxima diaria alcanzó o superó los 40 ˚C, con bastantes días en que se rebasaron los 45 ˚C, alcanzándose un pico de 50 ˚C, al margen de la concatenación de noches extremadamente cálidas.

Esta excepcional ola de calor ha puesto a prueba la capacidad de supervivencia de centenares de millones de personas en ese par de países asiáticos. Mientras escribo estas líneas, el episodio todavía estaba inconcluso y no se han dado a conocer cifras oficiales de fallecidos que se puedan asociar con el calor extremo. Seguramente serán algunos miles, pero no llegarán a ser decenas ni centenares de miles de individuos, gracias a que la humedad ambiental no llegó a ser alta, en cuyo caso habríamos asistido a una catástrofe humana de tintes apocalípticos. En cualquier caso, cada vez se está produciendo más veces y en más sitios la letal combinación de altas temperaturas y un elevado contenido de vapor de agua en el aire, lo que provoca un ambiente bochornoso al que resulta muy difícil adaptarse.

En 2020, un estudio publicado en la revista Science Advances confirmó que ya se están produciendo miles de episodios donde se da ese peligroso cóctel de calor extremo y humedad también extrema en distintas regiones de la Tierra, sin que hubiera apenas precedentes en los registros meteorológicos. En algunos casos, como en la zona del Golfo Pérsico, se ha llegado a superar el límite teórico de supervivencia humana. La habitabilidad de algunos lugares está en juego. La información revelada por este estudio es inquietante, ya que se adelanta varias décadas a lo que apuntaban algunas proyecciones climáticas para finales de siglo sobre la magnitud que podría alcanzar el calentamiento global en la zona tropical y subtropical. Esas condiciones tan extremas ya se están dando en el planeta, y el impacto que puede tener en las personas y las economías de los países afectados puede ser devastador.

Entre los lugares donde se han registrado esas combinaciones poco deseables de altas temperaturas y alto contenido de humedad están gran parte de la India, Pakistán, Bangladesh, el noroeste de Australia, el golfo de California, el noroeste de México y las costas del Mar Rojo. Los registros más extremos —potencialmente letales

— se han llegado a medir hasta en catorce ocasiones en las localidades de Damman, en Arabia Saudita, Doha, en Qatar, y Ras Al Kahaimah, en Emiratos Árabes Unidos. La población de esas ciudades suma algo más de tres millones de personas.

En España, el calor extremo puede alcanzarse por varias vías y no se restringe únicamente al período estival. En determinadas franjas costeras la acción de los vientos terrales da lugar a notables subidas de temperatura, llegando a alcanzarse valores del orden de los 40 ˚C. Los episodios típicos de calor vienen de la mano de dorsales cálidas, procedentes del norte de África, que abrazan en parte o en su totalidad la península ibérica y los dos archipiélagos. Con la vista puesta en las proyecciones climáticas, es principalmente en los meses estivales y en el área mediterránea donde serán cada vez más probables esas combinaciones de humedad y temperatura incompatibles con el confort climático, que ponen al límite nuestra capacidad de adaptación y disparan las tasas de mortalidad.

MÁS ENERGÍA DISPONIBLE

Seguro que ha escuchado hasta la saciedad lo de que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Así se expresa en lenguaje llano, sin tecnicismos, el primer principio de la termodinámica o de la conservación de la citada energía. Es aplicable a cualquier sistema aislado. Si pensamos en la atmósfera no lo es, ya que, tal y como hemos explicado, forma parte del sistema climático (de la Tierra) e intercambia masa y energía con el resto de componentes que lo integran, pero en primera aproximación este sí que podemos considerarlo como tal, teniendo en cuenta que los flujos de entrada y salida de materia al planeta son despreciables y los de energía no varían de forma significativa a escalas de tiempo plurianuales.

El calentamiento global no ha aparecido por arte de magia, la ciencia ha podido demostrar que la acumulación de calor tanto en la baja atmósfera como en la parte superficial de los océanos es una consecuencia directa de la acumulación de gases de efecto invernadero en el aire provenientes de la quema de combustibles fósiles, cuyo origen está en la materia orgánica que constituía la biosfera primitiva. Tiene, por tanto, un origen interno en un sistema termodinámico que, tal y como hemos apuntado, podemos considerar aislado. Puesto que ese exceso de energía calorífica que está haciendo subir la temperatura media planetaria no se ha creado de la nada ni tampoco se va a destruir de forma espontánea (lo que violaría el primer principio de la termodinámica), necesariamente se transforma, que es justamente lo que estamos viendo: fenómenos meteorológicos cada vez más extremos.

Una de las formas en que se está manifestando esa transformación es a través de la intensificación de determinados procesos que tienen lugar en la atmósfera, como el que da lugar a las precipitaciones, donde el contenido de vapor de agua en el aire juega un papel clave. Su capacidad de contener agua en estado gaseoso, potencialmente precipitable, depende de la temperatura, pero no linealmente sino de forma exponencial. Para que en el aire

se produzca el cambio de estado del agua de fase gaseosa a fase líquida o sólida tienen que alcanzarse las condiciones de saturación del vapor de agua y que la humedad relativa alcance el 100 %. El calentamiento global está haciendo que cada vez tengamos aire más cálido y húmedo discurriendo por la baja atmósfera. Ese transporte de un aire con un contenido extra de vapor de agua hace que, cuando se dan situaciones propicias para que se produzcan precipitaciones, su intensidad se dispare. Es algo que se empieza a observarse de forma recurrente en diferentes ámbitos geográficos.

Si pensamos en el Mediterráneo, sabemos que allí a veces llueve torrencialmente porque cada cierto tiempo se dan los ingredientes necesarios para ello. Lo que está pasando ahora es que cuando por allí «cae el cielo» se están dando con mayor frecuencia picos de elevadísimas intensidades de precipitación; los procesos que dan lugar a esas lluvias torrenciales tienen un plus de eficiencia. Aparte de eso, se observa una significativa desestacionalización. El cóctel de ingredientes ya no se restringe casi exclusivamente a los meses otoñales que es cuando, a priori, en el Mediterráneo Occidental se dan las condiciones más favorables para que se produzcan grandes episodios de lluvias; ahora dicha circunstancia puede desencadenarse en cualquier época del año. Las características del clima y el comportamiento meteorológico en ese ámbito geográfico (latitudes templadas del hemisferio norte) se están subtropicalizando.

En el ámbito tropical también se están observando cambios que encajan bien con ese plus de energía que, en forma de calor y humedad, contiene el aire en el escenario climático actual. Desde principios de la década de 1980 se constata una mayor rapidez de desplazamiento de los ciclones tropicales en las distintas cuencas oceánicas donde se forman. También se detectan cada vez más de estos sistemas discurriendo por zonas situadas más al norte tanto en el océano Atlántico como en el Pacífico, y unos procesos de intensificación más veloces, a los que se hizo referencia en el capítulo anterior. En la formación y la intensificación de un ciclón tropical intervienen factores dinámicos, alguno de los cuales puede verse inhibidos total o parcialmente en el marco del calentamiento global, pero lo que parece fuera de toda duda es que la energía calorífica que está acumulando el aire en niveles bajos y el agua de

la capa superficial de los océanos está favoreciendo la intensificación de distintos procesos ligados a los ciclones tropicales, observándose cambios en algunas pautas de su comportamiento.

La música puede ayudar a mejorar el mundo, porque crea emociones. Y esa emoción hace, como su etimología indica, que nos movamos y nos motivemos para actuar de la manera necesaria. El clima en 2050 estará bien solo si comenzamos a cuidarlo desde… YA. Soy optimista y espero que para entonces nuestros hijos y nietos nos recuerden como la generación que tomó la iniciativa individual y colectivamente, para conseguir parar el cambio climático generado a lo largo de los siglos XX y XXI.

JUAN ANTONIO SIMARRO

Compositor, pianista y productor musical

Cuando señalé (también en el capítulo 3) que la expansión térmica del agua es el principal factor que contribuye en la actualidad a la subida del nivel del mar, hay que pensar que ese proceso físico (mecánico) no deja de ser una transformación de energía, inducida por el calor que están absorbiendo con rapidez los océanos a través de su superficie. En la troposfera está ocurriendo algo parecido. Gracias a las observaciones de los globos que se lanzan a diario para realizar radiosondeos y de distintos satélites meteorológicos, se ha podido comprobar cómo la tropopausa (zona de separación entre la troposfera y la estratosfera) está ascendiendo a un ritmo de entre cincuenta y sesenta metros por década en los últimos cuarenta años. Este hecho tiene sus implicaciones, sobre todo si pensamos en tormentas y en la intensidad de los fenómenos asociados a ellas. En la tropopausa se produce una inversión térmica que frena en seco el desarrollo vertical de los cumulonimbos (las nubes de tormenta). En la medida en que ese nivel de atmósfera siga ascendiendo, dichas nubes podrán crecer algo más hacia arriba, lo que puede intensificar

la actividad eléctrica, generar granizadas más intensas o frentes de racha más violentos. Al margen de todo lo anterior, ahora el combustible que alimenta a las tormentas (aire húmedo) está más enriquecido de vapor de agua.

FILOMENA Y LUCIFER

Al concebir el esquema del presente libro, antes de la pandemia, pensé que estaría bien incluir en este capítulo un par de extremos climáticos de magnitud extraordinaria vividos en primera persona. En mis cincuenta y tres años de existencia hay unos cuantos donde elegir (la ola de calor del verano de 2003 es uno de ellos, sin duda), pero no tuve que remontarme a mi infancia, adolescencia, etapa universitaria o a cuando empecé a vivir del aire (tal como describió su trabajo el meteorólogo Mariano Medina, uno de mis principales referentes). En 2021, ya metido en la redacción de algunas partes del libro, Filomena en invierno y Lucifer en verano me brindaron los dos eventos que necesitaba; ambos del mismo año, cercanos en el tiempo, pero de distinto signo, aunque con la misma firma: la del cambio climático.

La borrasca Filomena puso patas arriba a media España en enero de 2021. Aquel mes fue, con diferencia, el período de actividad más frenética en mis veinticinco años de profesión. Todo comenzó la semana previa al inicio del episodio invernal, en que los modelos de predicción iban confirmando en sus sucesivas pasadas (actualizaciones) la magnitud que iba a tener la nevada y la intensidad del frío posterior. Una vez que cayó la nieve y se tomó conciencia de que estábamos asistiendo a algo histórico, los periodistas salieron a la caza de los meteorólogos. Perdí la cuenta de las entrevistas que concedí aquellos días y la cantidad de información que tuve que manejar, buceando en fuentes que me permitieran documentar nevadas similares ocurridas en el pasado.

¿Se puede relacionar Filomena con el cambio climático? Formulada así o con ligeras variaciones, esta fue la pregunta estrella en aquel carrusel de entrevistas, acompañada en muchos casos por un comentario de extrañeza por parte del periodista, ya que una nevada de tal calibre y unas heladas tan intensas no son lo que uno espera, a priori, en un mundo que se está calentando a toda velocidad. Las respuestas que fui dando incidían en dos aspectos.

Por un lado, que un episodio tipo Filomena no es incompatible con el cambio climático; vemos que ocurren cada año situaciones invernales parecidas en distintas regiones del mundo, aunque dominan los episodios de signo contrario: las olas de calor extremo, siendo cada vez más las regiones terrestres y la población afectadas por ellas. Por otro, la singularidad de la borrasca Filomena, con una fase en la que llegó a adquirir ciertas características tropicales (con lo que ello implica en términos de mayor potencial de agua precipitable), invita a pensar en que es el resultado de esa acción y reacción en la atmósfera que abordamos en el apartado 3.2.

A finales de 2020 comenzó a gestarse un calentamiento súbito en la estratosfera polar del hemisferio norte, como respuesta a un forzamiento provocado por las grandes ondas planetarias que circunvalan la región ártica. Dicha circunstancia favoreció la aparición de grandes ondulaciones en el chorro polar. Esto permitió, por un lado, que llegará una masa de aire polar, muy frío, a nuestro país, a finales de diciembre, y, debido a un anticiclón de bloqueo en el Atlántico, la borrasca Filomena encontró un pasillo al sur, se enganchó al chorro subtropical y se fortaleció mucho. Fue el cóctel perfecto para que se produjera la gran nevada y la ola de frío posterior.

De momento, no hay estudios concluyentes que demuestren que esos CSE y la rotura del vórtice polar estén aumentando de frecuencia, debido a los impactos del calentamiento global en el Ártico, pero es algo que no se puede descartar. Parece claro que las grandes anomalías cálidas que se están produciendo allí están provocando un forzamiento y la respuesta en la dinámica atmosférica encaja bien con la sucesión de situaciones meteorológicas extremas que estamos observando. Se están produciendo más incursiones del chorro subtropical en latitudes templadas (en muchos casos con un río atmosférico asociado), lo que junto a la mayor ondulación del polar hace que pasen a ser más frecuentes las borrascas de alto impacto en España, capaces de provocar lluvias muy abundantes (nieve en el caso de Filomena), alternando con períodos prolongados de escasez de precipitaciones, lo que conlleva sequías y también destacados episodios de calor.

Las dorsales de aire cálido, de origen subtropical, son el

contrapunto a las vaguadas de aire frío, de origen polar, y aunque van alternando unas y otras, las primeras —asociadas a las citadas sequías y a las olas de calor— van ganando la batalla, teniendo en los anticiclones de bloqueo sus grandes aliados. En el verano de 2021 tuvimos en Europa una ola de calor extraordinaria, todavía fresca en la memoria, sin olvidarnos tampoco de las inundaciones catastróficas que afectaron principalmente a Bélgica y Alemania y que, lamentablemente, provocaron decenas de fallecidos. Según los datos proporcionados por el Servicio de Cambio Climático de Copernicus, fue el verano europeo más cálido desde que existen registros, con una anomalía de +1 °C con respecto a la temperatura media estival del período 1991-2020.

La intensa y prolongada ola de calor ocurrida a lo largo de los meses de julio y agosto, que se cebó particularmente en la región mediterránea, contribuyó, sin duda, a esa anomalía térmica positiva. Como suele ocurrir con las olas de calor, fueron varias oleadas —algunas de hasta dos semanas de duración— que, de forma intercalada, fueron afectando a distintas áreas geográficas, batiéndose récords de temperatura, provocando una sequedad extrema y favoreciendo la generación y propagación de numerosos incendios forestales de consecuencias devastadoras. La superficie quemada por el fuego superó las 800.000 hectáreas.

En Italia bautizaron a este evento de calor extremo como Lucifer (Lucifero, en italiano); un nombre ocurrente, que alude explícitamente a las condiciones infernales que se vivieron en el sur de Italia y en otros muchos lugares habitados del sur de Europa y el norte de África, desde el oeste de Turquía hasta España y Portugal. En la pequeña localidad siciliana de Floridia, próxima a Siracusa, una estación de una red agrometeorológica registró 48,8 °C el 11 de agosto. Provisionalmente, a falta de que lo certifique la OMM de forma definitiva, es la nueva temperatura máxima absoluta de Europa. El día siguiente, en la localidad tunecina de Kairouan se alcanzaron los 50,2 °C, que es la temperatura más alta jamás medida en África. Seguro que hay zonas del Sáhara donde la temperatura supera ese valor durante los veranos extremadamente cálidos de aquel gigantesco desierto, pero en esos lugares tan inhóspitos y extremos no disponemos de estaciones meteorológicas que puedan certificarlo.

Tras el paso por Turquía, Grecia, Italia y el norte de África, el ardiente tridente de Lucifer llegó también a España. Lo hizo a mediados de agosto y también cayeron récords absolutos de temperaturas máximas y de mínimas altas en cascada. En Montoro (Córdoba) se registraron 47,4 ˚C el sábado 14 de agosto de 2021, un valor que ha pasado a ser la temperatura más alta medida en España por la red de estaciones meteorológicas (automáticas en este caso) de AEMET. Desde que se empezó a hablar del calentamiento global, la frecuencia, magnitud y extensión de las olas de calor es claramente ascendente; una tendencia inequívoca, pero lo verdaderamente llamativo es la rapidez con la que el clima se está volviendo más extremo y el hecho de que cada vez lo experimentemos más de cerca, en el lugar donde vivimos. Termino este apartado con un ejemplo que ilustra a la perfección lo que acabo de apuntar.

Trasladémonos por un momento a Toledo. Situada en el centro de la península ibérica, su clima es mediterráneo de tipo templado, aunque con influencia atlántica. Los veranos son secos y calurosos y los inviernos fríos y lluviosos, habitualmente sin grandes excesos. En 2021, los toledanos vivieron cuatro eventos extremos de magnitud extraordinaria. El 7 de enero, al paso de Filomena, se acumuló en la ciudad una capa de nieve cercana al medio metro de espesor. En la larga serie de observaciones (centenaria) del observatorio meteorológico de Toledo, no se había registrado con anterioridad una nevada de esa magnitud (51 l/m^2 en 24 horas, en forma de nieve). Cinco días después, el 12 de enero, metidos de lleno en la ola de frío potenciada por la presencia del manto nivoso sobre el suelo, se midieron allí -13,4 ˚C: la nueva temperatura mínima absoluta.

Ya en verano, el mes de agosto dejó para la historia otro par de efemérides meteorológicas extraordinarias en Toledo. El día 13, con la llegada de la ola de calor, se registraron 44,2 ˚C, un valor que pasó a ser la nueva temperatura máxima absoluta del observatorio. Y finalmente, el día 31, una dana propició un episodio de lluvias torrenciales bastante insólito en esas fechas. El pluviómetro recogió 56,6 l/m^2. No llegó a ser la mayor cantidad de precipitación acumulada en 24 horas en la ciudad imperial (la efeméride tuvo lugar el 11 de octubre de 2008, con 89,6 l/m^2), pero sí que se

alcanzaron picos de intensidad de precipitación nunca antes registrados allí.

Los dos anteriores párrafos resumen bien la naturaleza del cambio climático al que estamos asistiendo: extremos climáticos (fenómenos meteorológicos adversos, si prefiere) cada vez más frecuentes, que nos afectan cada vez más de lleno. Así debemos de entenderlo, aunque haya períodos en que juegue con nosotros al escondite y nos haga pensar que siempre ha hecho calor en verano, frío en invierno o ha diluviado y se han producido riadas. Sí que lo ha hecho, y con una magnitud no muy distinta a lo ocurrido en Toledo en 2021, pero esa concentración de eventos tan extremos en un punto del mapa (extensible al lugar donde estás ahora mismo leyendo este libro) es sintomático de lo que está ocurriendo y de lo que, como veremos en el capítulo 5, puede ir a más si no tomamos cartas en el asunto.

CALORES MORTALES Y ADVERSIDADES VARIAS

Es un hecho constatable que la superación de determinados umbrales de temperatura máxima y mínima —distintos dependiendo del lugar— dispara las tasas de mortalidad, lo que afecta particularmente a la población más vulnerable. Cada vez se llevan a cabo más estudios que relacionan el impacto de las temperaturas extremas que se alcanzan en las olas de frío y de calor con la citada mortalidad. Si bien los grandes episodios de frío invernal se cobran la vida de miles de personas cada año en el mundo, en el marco del calentamiento global en el que nos encontramos, las olas de calor son cada vez más frecuentes y de mayor magnitud, lo que pone en riesgo la vida de un número creciente de personas.

Cuando se relaciona el calor extremo con la mortalidad, no solo se contabiliza el número de personas que fallecen de forma directa debido a los golpes de calor (pocos casos), sino también y preferentemente el de aquellas en las que un episodio prolongado de altas temperaturas agrava determinadas patologías, culminando en un fatal desenlace. Desde la Organización Mundial de la Salud se apuntaba con acierto hace unos años que el cambio climático no causa por sí mismo enfermedades, pero sí que amplifica los efectos de muchas de ellas. Pensando en las olas de calor y su tendencia a aumentar, parece claro que esa evolución también vendrá acompañada de un número mayor de fallecimientos por las causas apuntadas.

Tanto los países ribereños del Mediterráneo como América del Sur y el sureste asiático son las regiones del mundo donde mayor es la mortalidad extra asociada al calentamiento global. Para el conjunto del planeta y en números redondos, una de cada tres muertes debidas al calor extremo se puede atribuir a él. A la vista de las proyecciones climáticas, ese porcentaje aumentará, previsiblemente, en los próximos años y décadas. La expresión «calor mortal» puede resultarnos alarmista y exagerada, pero hay razones objetivas para

pensar que el riesgo de mortalidad por calor extremo se incrementará en el futuro, y no solo a largo plazo, sino a corto. Algunas zonas de la Tierra se convertirán en inhabitables. El sur de Asia —densamente poblado— será una de ellas. El deterioro de las condiciones ambientales irá provocando grandes migraciones en la región, aparte del aumento de la mortalidad debida a la letal combinación de humedad y calor extremo, sobre la que ya hablamos con anterioridad.

Los impactos del calor extremo no quedan ahí. Las fuentes de energía son uno de los elementos clave para mitigar el cambio climático, pero el sector energético también es vulnerable al calentamiento global y, en particular, a las olas de calor. A escala mundial, parece claro que aumentarán las necesidades de refrigeración y disminuirán las de calefacción, en la medida en que las temperaturas sigan ascendiendo. Por otro lado, la persistencia de días calurosos, así como el mayor número de olas de calor extremo, afectarán de manera creciente a las infraestructuras energéticas, especialmente a las redes de suministro eléctrico, reduciendo su eficacia y, por tanto, la disponibilidad de energía para los usuarios, lo que aumenta nuestra vulnerabilidad y el riesgo de mortalidad. Hemos entrado en un bucle. Hay que ver de qué forma podemos escapar de él. A ello dedicaremos parte del siguiente capítulo.

V.

PROYECCIONES Y ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO

Llega el momento de mirar hacia el futuro. Disponemos del conocimiento suficiente y de sofisticadas herramientas para tratar de anticipar cómo irá evolucionando el clima terrestre a lo largo del presente siglo. En dicho ejercicio hay varias reglas del juego. En primer lugar, tenemos que aceptar nuestras limitaciones a la hora de modelizar el complejísimo sistema climático y todos los procesos e interacciones que tienen lugar en él. Por otro lado, hay incertidumbres que no podemos esconder debajo de la alfombra. Hemos de conformarnos con cuantificarlas y acotarlas. Sobre esa base se elaboran las proyecciones climáticas.

En este quinto capítulo abordaremos cuestiones importantes, como la propia naturaleza y el modus operandi de los modelos climáticos, en los que el IPCC basa sus informes. La referida incertidumbre obliga al citado organismo internacional a plantear distintos escenarios de emisiones. En su Sexto Informe (AR6) se ponen sobre la mesa cinco posibles sendas. La proclamada emergencia climática urge a adoptar medidas urgentes de mitigación para conseguir esquivar los peores caminos (escenarios de altas y muy altas emisiones), que nos llevarían a un mundo en el que estaría en juego nuestra propia supervivencia.

La descarbonización es un reto de dimensiones mayúsculas, al que nos tendremos que enfrentar de aquí a mediados de siglo si queremos salvar los muebles. Para ello, no queda otra que cambiar profundamente muchas de las cosas de nuestra sociedad. Saber si lo lograremos con la urgencia requerida es un misterio. La evolución humana no viene con libro de instrucciones y hasta ahora para progresar nos hemos ido aprovechado de la barra libre de los recursos naturales. Su finitud y la probada insostenibilidad de nuestro actual modo de vida tiene que tocar techo para dirigirnos

por una senda que no sea excesivamente traumática. En esa transición, tendremos también que enfrentarnos a la oposición de aquellos que se resisten a cambiar el mundo en unos términos opuestos al modelo capitalista, basado en un crecimiento económico ilimitado. Al final del capítulo dedicaré algunas palabras —las justas— a los negacionistas.

UNA EMERGENCIA EMERGENTE

Llevamos ya treinta años hablando del cambio climático, si bien a lo largo de todo ese tiempo el volumen de información, su tratamiento mediático y el impacto en la sociedad no siempre han sido los mismos, pudiendo distinguirse varias etapas. El punto de partida lo podemos situar en 1988, con la creación del IPCC, bajo el paraguas de Naciones Unidas. Los científicos fueron los primeros informadores del cambio climático, instando a los políticos y la sociedad a actuar para evitar que el clima terrestre evolucionara por una senda poco deseable.

Con la globalización, todos dependemos de todos y el planeta, que antes nos parecía inabarcable a nuestra escala, se ha convertido en perfectamente abarcable, incluso pequeño. La Tierra es cada vez un hogar más limitado y sucio para una vida cada vez menos diversa y frágil. La especie humana necesita biodiversidad para sobrevivir. Tenemos que ponernos de acuerdo para que la llamada por los expertos «sexta extinción» no se produzca del todo. Entre otras razones porque nuestra especie se extinguirá con las demás.

SALVADOR GÓMEZ VALDÉS

Periodista. Director de La aventura del saber, en TVE

En esa primera etapa, que podemos prolongar hasta 2006, el cambio climático fue despertando cada vez más interés social, a medida que el IPCC fue dando a conocer sus tres primeros informes de evaluación (años 1990, 1995 y 2001), cada uno de los cuales fue ganando en contundencia con respecto al anterior, en lo relativo a la responsabilidad humana en el cambio climático observado. A

pesar de ello, al inicio del siglo XXI todavía un amplio porcentaje de la población veía el cambio climático como algo que no le afectaba directamente, aunque el discurso de los científicos comenzaba a calar poco a poco en más personas.

La segunda etapa tuvo a un indiscutible protagonista: el exvicepresidente de EE. UU. Al Gore y su película Una verdad incómoda (2006). Con un tono marcadamente catastrofista, su mensaje sirvió para concienciar del problema principalmente a una parte de la sociedad estadounidense, que hasta ese momento pensaba que el cambio climático no iba con ella y que sus impactos no podían poner en riesgo su boyante economía y elevado nivel de vida. El mensaje de Al Gore estaba apoyado en los informes del IPCC, si bien eligió deliberadamente los peores escenarios previstos. Esta forma exagerada y dramática de plantear el asunto también tuvo sus detractores, incluso dentro de la comunidad científica.

Al Gore consiguió crear una burbuja mediática que convirtió al cambio climático en unos de los temas estrella, alcanzando gran popularidad. En 2007, se publicó el Cuarto Informe del IPCC (AR4), cuya difusión se vio favorecida por ese «efecto Gore», aunque al año siguiente la burbuja se fue desinflando, para finalmente estallar. Los años siguientes continuaron publicándose noticias en la prensa sobre el cambio climático, pero el interés decayó mucho, para desesperación de los científicos, que seguían reclamando urgencia en las medidas de mitigación y adaptación. Tras esa travesía del desierto, a finales de 2015 se produjo un punto de inflexión con el Acuerdo de París, que puso de nuevo el cambio climático en el candelero.

Desde ese momento, con el jarro de agua fría que supuso la llegada de Donald Trump a la presidencia de EE. UU. y su declarado negacionismo climático, los movimientos sociales que reclaman una emergencia climática a los dirigentes políticos no han parado de crecer. Estamos ahora mismo viviendo la última etapa (ralentizada en 2020 con la pandemia y más recientemente con la guerra en Ucrania), protagonizada por muchos miles de personas anónimas y centenares de organizaciones, en su mayoría de corte ecologista.

La joven sueca Greta Thunberg se convirtió en la abanderada de este movimiento social que logró movilizar a muchos jóvenes y no

tan jóvenes de todo el mundo. Cada vez hay más personas que entienden que si la sociedad no actúa de forma rápida y decidida, cambiando hábitos que contribuyan a reducir las emisiones de GEI a la atmósfera y frenando la degradación medioambiental, nuestro modo actual de vida no se podrá estirar mucho más en el tiempo y terminará colapsando. Los impactos del calentamiento global nos desbordarán.

La movilización ciudadana parece imparable, aunque su calado y recorrido es una incógnita. El conocimiento científico es el faro que debe guiarnos. Solo así tendremos cierta garantía de que las acciones que emprendamos darán resultado. Hay que confiar en la ciencia. El problema es que los seres humanos somos impulsivos por naturaleza y nos movemos a menudo por las emociones e intereses particulares cortoplacistas, dejando en un segundo plano la parte racional. Con la emergencia climática encima de la mesa, hay que actuar rápido, pero con inteligencia, moderación y sentido común, sin histerismos y sin dejarnos arrastrar por las posiciones extremistas, marcadamente ideológicas, que vemos que han ido aflorando y que, lejos de aportar soluciones, agudizan el problema.

La presión social siempre provoca cambios (acción-reacción), que seguramente iremos viendo en los próximos años. Mucho más difícil es —rozando la utopía— conseguir transformar el mundo profundamente en los plazos marcados en las últimas cumbres del clima. De momento, los jóvenes están empezando a moverse, seguramente sin ser del todo conscientes de las implicaciones que tendrán para ellos mismos y para toda la población sus legítimas reivindicaciones.

DESTINO 2050: UN VIAJE DE AMBICIÓN CLIMÁTICA

Antes de imaginar el escenario climático dentro de treinta años, me gustaría retroceder, por un instante, otros treinta. Precisamente en 1992, un total de 159 países aprobaban sus compromisos para frenar el cambio climático durante la histórica Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro. Un hito en la gobernanza global que marcaría el camino a seguir. Después, vinieron el Protocolo de Kioto en 1997 y,

más adelante, el Acuerdo de París de 2015; la integración del cambio climático en la agenda económica y el fortalecimiento de las ciencias del clima en todas sus dimensiones.

Se han producido indudables avances en términos de política climática y concienciación ambiental. Sin embargo, nuestra capacidad de destrucción ha sido mucho mayor que la voluntad para luchar contra el cambio climático: las emisiones de CO2 han alcanzado niveles sin precedentes, la temperatura media del planeta ha seguido aumentando, asistimos a fenómenos meteorológicos extremos cada vez más frecuentes e intensos y muchos ecosistemas naturales se han degradado, acabando con un sinfín de especies.

Analizar con mirada crítica nuestros logros durante las últimas décadas y los retos aún pendientes es fundamental para marcarnos nuevos horizontes; para proyectarnos en el futuro que queremos y avanzar hacia él con solidez y celeridad.

La crisis derivada de la covid-19 nos ha enseñado que resulta imprescindible atender a la sostenibilidad de nuestro modelo de desarrollo sin superar los límites físicos. No hay momento más adecuado, por inaplazable, para acelerar la transición energética y reforzar la resiliencia frente al cambio climático con el objetivo de alcanzar la neutralidad climática a mitad de siglo.

Necesitamos reforzar la ambición climática. 2050 es un destino y una cuenta atrás para actuar frente a la emergencia climática, el mayor y más transversal desafío de la humanidad. No debemos perder tiempo ni confianza en nuestra inmensa capacidad como sociedad para resolver problemas. Y, sobre todo, debemos concentrar nuestro esfuerzo y actuaciones en la respuesta ágil y sistémica que el cambio climático demanda.

TERESA RIBERA

Vicepresidenta y ministra para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

Las declaraciones de emergencia climática que se están llevando a cabo por todo el mundo son simbólicas, pero son un paso necesario para que empiecen a dejar de ser una mera declaración de intenciones. Las primeras declaraciones de esta naturaleza las fueron adoptando algunas instituciones como universidades; se fueron sumando los ayuntamientos de algunos municipios y grandes ciudades, gobiernos regionales y finalmente Estados. Ojalá la cosa no quede ahí, sino que pronto se materialice en acciones más concretas que está demandando una parte cada vez mayor de la sociedad.

PASE DE MODELOS

Para estudiar la atmósfera, bien su comportamiento a corto plazo como a mayores horizontes de predicción, necesitamos modelos que nos permitan aproximarnos de la mejor forma posible a la realidad. En el caso que nos ocupa, un modelo climático es un conjunto de ecuaciones matemáticas que tratan de describir las propiedades físicas, químicas y biológicas del sistema climático —principalmente de la atmósfera y océano—, así como de las interacciones y los procesos de retroalimentación que se producen en él. En realidad, es tal la complejidad del asunto, que la modelización climática actual integra distintos modelos, cada uno de los cuales acomete con detalle algún aspecto en particular.

Hay modelos climáticos globales y regionales y son diferentes a los de circulación general de la atmósfera en que se basan los pronósticos meteorológicos. En los estudios de cambio climático se trabaja con proyecciones para distintos escenarios de emisiones de CO2 que se seleccionan como punto de partida. Al igual que ocurre con cualquier modelo matemático, los usados en clima llevan asociada una incertidumbre, y esto es algo que casi nunca aparece en las informaciones que salen en la prensa, cuando leemos, por ejemplo, que en un determinado lugar tendremos tal temperatura en verano en el año 2050, o que para entonces el nivel del mar subirá tantos centímetros. Dependiendo de la variable en cuestión y de la región terrestre, la incertidumbre será mayor o menor, pero siempre la habrá.

El IPCC en sus informes cuantifica en cualquiera de las informaciones que ofrece la incertidumbre asociada a las mismas, lo que nos da una medida del nivel de conocimiento que se tiene de las distintas variables y de todos los procesos implicados en el comportamiento del clima. Las fuentes de incertidumbre son muy variadas, como las propias limitaciones técnicas de los modelos, las aproximaciones que se tienen que hacer para integrar en ellos procesos de pequeña escala, o el simple hecho de no tener una bola

de cristal para saber a qué ritmo seguirá creciendo la población humana o cómo lo hará la economía, lo que lleva implícito unas emisiones mayores o menores, de ahí que tengan que establecerse distintos posibles escenarios, tal y como se contará en el próximo apartado.

LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA, UN BIEN DE PRIMERA NECESIDAD

Desde la Fundación para la Investigación del Clima (FIC) miramos con mucha preocupación los modelos climáticos y la regionalización de sus impactos a escala local. El clima en 2050 está a la vuelta de la esquina. Está tan cerca, que las proyecciones de cambio climático, basadas en diferentes escenarios socioeconómicos, muestran un calentamiento muy similar que solo empieza a diferenciarse justo para la segunda mitad del siglo XXI. Para los próximos 30 años, el consenso científico indica que la temperatura media ascenderá aproximadamente +1 ˚C. Esto se sumará a los casi +1,5 ˚C que ya hemos experimentado en los últimos 100 años a nivel global. El calentamiento podría ser casi el doble en el ya muy cálido Mar Mediterráneo, llegando a casi +3 ˚C en 2050, con extremos que serán unos +6 ˚C más cálidos.

Sin embargo, la certidumbre del cambio climático es más compleja para el balance de la precipitación, ya que los extremos opuestos podrían compensarse entre sí (manteniendo la media anual), conviviendo períodos secos muy largos alternados con pocos días lluviosos, pero con mayor intensidad. De hecho, la mayor energía del sistema climático repercutirá en una aceleración del ciclo hidrológico, con mayor evaporación (hasta el doble de días secos) pero también con mayor cantidad de agua disponible en la atmósfera, que hará incrementar la intensidad de la lluvia hasta un 30 % en el Mediterráneo, concentrada en una menor duración. Lamentablemente, esto impactará en la sociedad con una mayor desigualdad de los recursos derivados del agua, que podría sumarse a la pobreza energética: en 2050, para algunas personas será más difícil enfrentarse a los golpes de calor diurno y a las noches más tórridas. Además, los extremos de frío no llegarán a desaparecer del

todo.

Ahora bien, hay soluciones. Con mucho esfuerzo, sería posible reducir los mayores impactos del final del siglo XXI, pero parece que llegamos muy tarde para mitigar los efectos del cambio climático actual y el de 2050, a los que habrá que adaptarse irremediablemente. Los servicios climáticos, es decir, aquellos que traducen la información climática en indicadores específicos para cada sector, serán cada vez más necesarios para apoyar la toma de decisiones en las tan difíciles tareas de adaptación al cambio climático. Esto será útil no solo para la reducción de impactos sino también para aprovechar mejor las ventanas de oportunidades que pueden abrirse en algunos casos.

ROBERT MONJO

Doctor en Física. Especialista en modelización climática. Fundación para la Investigación del Clima

Para hacernos una idea de las dificultades que entraña la modelización climática, pensemos en las nubes, siempre cambiantes sobre nuestras cabezas. Es, probablemente, uno de los elementos que más quebraderos de cabeza da a los científicos encargados de introducir mejoras en los modelos climáticos. En su formación, los aerosoles cumplen un papel fundamental, ya que para que puedan formarse las gotitas de nube —microscópicas— es necesaria la presencia de núcleos de condensación, bien de origen natural, como polvillo mineral, pólenes o sales marinas, bien partículas en suspensión generadas por la combustión que provocamos los seres humanos con nuestra actividad industrial y el transporte. Por lo tanto, intervenimos en los procesos de formación de nubes en la atmósfera. La cosa se complica más aún si tenemos en cuenta que, en función del tipo de nube que se forme (que tenga un mayor o menor espesor y que ocupe una posición más o menos alta en la troposfera), su contribución al balance de energía es distinto, pudiendo contribuir a calentar o a enfriar el aire situado en las cercanías de la superficie terrestre.

Conocer cómo actúan las nubes a escala tanto global como regional es fundamental en los modelos climáticos. Empieza a entenderse mejor la interacción entre los aerosoles y la formación de nubes, lo que conlleva mejoras en su modelización. Gracias a ellas, los nuevos modelos acotan mejor el rango de temperaturas en el que, previsiblemente, se situará el calentamiento global que iremos experimentando a lo largo del presente siglo. Según el abanico de escenarios que plantea del Sexto Informe del IPCC, dicho rango queda situado (en valores promedio) entre 1,4 °C, según el escenario de muy bajas emisiones (SSP1-1.9), y 4,4 °C, del escenario de muy altas emisiones (SSP5-8.5), para el período 2081-2100.

Una de las principales novedades del AR6 con respecto a los cinco informes anteriores del IPCC es la regionalización. Las mejoras en la modelización apuntadas permiten ofrecer información específica de las distintas regiones del mundo. En el Sexto Informe se indican para casi una cincuenta de ellas, en que se han compartimentado las zonas continentales, los cambios observados en los episodios de calor extremo, lluvias torrenciales y sequías, asignando un nivel de confianza alta, media o baja a la contribución de nuestras actividades (léase emisiones) en tales cambios. En la medida en que siga mejorando la modelización climática, podremos bajar de la escala regional a la local. Esto es lo que realmente le interesa como ciudadano: saber qué impactos tiene y sobre todo tendrá el cambio climático en el lugar donde vive y desarrolla su actividad.

CINCO CAMINOS A ELEGIR

El Sexto Informe del IPCC es el más contundente de todos los que se han publicado hasta la fecha. El tiempo se agota. Leemos en él por primera vez que comienzan a alcanzarse puntos de no retorno, también se sugiere cambiar nuestro actual modelo productivo, a todas luces insostenible, basado en una insaciable explotación de los recursos naturales y en la quema masiva de combustibles fósiles. En la tercera parte del AR6, dedicada a la mitigación del cambio climático, se menciona —aunque solo de soslayo— el decrecimiento económico (que en ningún caso debe interpretarse como una vuelta a la Edad de Piedra, sino la búsqueda de un nuevo modelo basado en la sostenibilidad) como una de las vías para lograr descarbonizar a tiempo la atmósfera y evitar escenarios climáticos indeseados.

En el AR6 los científicos no están diciendo cosas muy distintas a las que expusieron, con rotundidad, en el anterior informe del IPCC (AR5), publicado en 2014. Lógicamente, en el tiempo transcurrido desde entonces ha aumentado nuestro conocimiento del cambio climático. Se certifica que está tomando carrerilla, con impactos crecientes y de mayor magnitud, que se perciben en todo el mundo cada vez de forma más nítida. La singularidad del calentamiento global es indiscutible, así como que nuestra influencia en él está haciendo que las olas de calor extremo, las lluvias torrenciales o las sequías sean más frecuentes e intensas y abarquen cada vez más zonas de la Tierra.

Desde el IPCC se indica que a menos que haya una reducción inmediata, rápida y a gran escala de las emisiones de gases de efecto invernadero, limitar el calentamiento global a +1,5 ˚C para finales de siglo de subida será imposible. Ese objetivo nos llevaría por el escenario de muy bajas emisiones, que bajo la denominación técnica SSP1-1.9 es uno de los cinco que contempla el AR6. En el anterior informe solo se consideraban cuatro. Si lográramos la descarbonización en 2050, tal y como se fijó en el Acuerdo de París (lo que para muchos científicos ya no es factible), el grado y medio

se superaría en 2040, pero a partir de mediados de siglo la temperatura media global iría descendiendo lentamente, estabilizándose en torno a ese valor en 2100. Teniendo en cuenta que la subida en la actualidad es de +1,2 °C, los impactos que iríamos viendo, aunque camináramos por la senda del escenario SSP1-1.9, serían significativamente mayores que los observados hasta ahora.

El panorama es radicalmente distinto en el escenario de muy altas emisiones (denominado SSP5-8.5), ya que en este caso la subida de la temperatura global a finales de siglo quedaría situada entre +3,3 y +5,7 °C. De evolucionar por ese camino, la adaptación sería traumática y lo que estaría en juego sería nuestra supervivencia, o cuanto menos la sociedad humana tal y como la conocemos. Entre ambos escenarios climáticos, situados en los extremos, el IPCC considera otros tres: el de bajas emisiones (SSP1-2.6), el de emisiones intermedias (SSP2-4.5) y el de altas (SSP3-7.0). Es razonable pensar que de aquí a mediados de siglo caminaremos por la senda trazada por alguno de ellos. Lo «ideal» sería hacerlo por el SSP1-2.6, de manera que no superásemos los +2 °C de ascenso de temperatura, que marca una peligrosa línea que hay que tratar de no cruzar. Ese debe ser nuestro principal objetivo, habida cuenta de la práctica imposibilidad de lograr la estabilización de la temperatura en +1,5 °C a final de siglo.

Las alarmas comenzarán a sonar cuando la temperatura media global alcance el famoso grado y medio. Tenemos algo menos de tres décadas de margen (hasta 2050) para lograr cumplir el objetivo de emisiones netas de carbono cero, lo que —teóricamente— estabilizaría la temperatura en torno a ese valor en 2100. Para lograrlo, la presente década (2021-2030) es decisiva, y la reducción de emisiones debe comenzar a producirse a un ritmo importante, desde ya. Si se mantiene la inacción climática o una acción excesivamente tibia, nos iremos dirigiendo hacia unos escenarios de difícil adaptación, que necesariamente acarrearán problemas.

EL CLIMA Y EL LOBO

Siendo niña escuché muchas veces el cuento de Pedro y el lobo, esa historia en la que un pastorcillo aburrido decidió divertirse gritando una y otra vez sin que fuera cierto: «¡¡Socorro que viene el lobo!!» Pedro se reía cuando los lugareños acudían en su auxilio hasta que un día el lobo llegó de verdad y nadie apareció en su ayuda pensando que se trataba de otra de sus chanzas.

Tengo la incómoda sensación de que con el relato del cambio climático sucede algo parecido. Llevamos muchos años recibiendo mensajes sobre la catástrofe a la que parece que el planeta se verá abocado sin remedio, pero somos incapaces de reaccionar.

Llevamos mucho tiempo oyendo que viene el lobo. Tanto, que nos hemos acostumbrado a los mensajes catastrofistas. Una rutina ante la que parece que hayamos desarrollado una especie de mecanismo de defensa. La imagen de Joe Biden, el presidente de la primera potencia mundial, adormilado durante la jornada inaugural de la COP 26 en Glasgow, es una metáfora perfecta de lo que pasa en el mundo. El problema es que ahora el lobo está aquí de verdad. Y no ha venido en son de paz.

PEPA FERNÁNDEZ

Periodista. Directora y presentadora en Radio Nacional de España

La clave del asunto reside en cómo evolucionen nuestras emisiones de GEI a la atmósfera, directamente relacionadas con las fuentes de energía que utilicemos y de cómo vaya cambiando nuestro modelo de sociedad. Si todo sigue más o menos como hasta ahora, nos dirigiremos irremediablemente al escenario de emisiones intermedias (SSP2-4.5) o al de altas (SSP3-7.0). Movernos entre esta nomenclatura técnica da un poco de mareo y a más de un lector puede llegar a producirle «ecoansiedad», que es como se ha bautizado el estado que angustia que padecen algunas personas al verse atrapados en esta especie de callejón sin salida al que nos va arrastrando el cambio climático.

Una de las incógnitas que hay encima de la mesa es saber si las acciones necesarias para frenar el calentamiento global, suponiendo que las lleváramos a cabo, conseguirían su objetivo o, por el contrario, hay tales inercias en el sistema climático que por muchos esfuerzos que hagamos ya no servirán. Esas inercias siempre han estado ahí, pero aumentan a medida que lo hace el calentamiento global. Unos investigadores llegaron recientemente a la conclusión de que suponiendo que nuestras emisiones de GEI alcancen su punto más alto durante la década de 2030 y disminuyan a cero en 2100, las temperaturas globales serán 3 °C más altas en 2500 que en 1850 y el nivel del mar será tres metros más alto.

A escala humana, el año 2500 está demasiado lejos, pero es interesante saber que si dejamos de emitir CO2 (suponiendo que lo consigamos a finales del presente siglo) la temperatura seguirá subiendo hasta esos +3 °C, aunque en el plazo de cinco siglos, por lo que la adaptación sería más factible que si esos tres grados o más suben de aquí a 2100. Para que no se produjera el aumento de temperatura proyectado tendríamos que haber conseguido llegar a las cero emisiones entre las décadas de 1960 y 1970, antes de que empezáramos a hablar del cambio climático.

No debemos caer en el desánimo, ya que nos queda aún un margen (pequeño) de maniobra. Tenemos que aprovecharlo, ya que es posible y deseable ir hacia un escenario de bajas emisiones y dar un giro copernicano a nuestro modelo de sociedad y a nuestra manera de interrelacionarnos con el planeta, tomando conciencia de la finitud de sus recursos. Es posible que aunque empecemos en los próximos años a reducir nuestras emisiones a la atmósfera, no lo hagamos al ritmo necesario, lo que implicará superar ese grado y medio. Con mucho esfuerzo también, quizás logremos estabilizar el calentamiento global a +2 °C a finales de siglo, lo que supone «solo» media décima de grado más que el grado y medio deseable. Esa diferencia puede parecernos pequeña, pero la magnitud de los impactos es mucho mayor, lo que empezaría a complicar mucho las cosas para las generaciones futuras. Lo positivo es que el cambio de modelo es posible y lo negativo y preocupante es que el margen de tiempo para lograrlo se reduce cada vez más.

DESCARBONIZAR EL MUNDO

La ciencia del clima es clara al respecto. No queda otra. Si queremos evitar escenarios climáticos peligrosos, que hagan tambalear nuestra civilización, tenemos que descarbonizar el mundo y además hacerlo en poco tiempo: en menos de 30 años. Es un reto mayúsculo, pero solo actuando así salvaremos los muebles, al menos durante algunas generaciones más. Me viene a la cabeza la disparatada escena de la película Los Hermanos Marx en el Oeste (Metro Goldwyn Mayer, 1940), en la que al grito reiterado de «¡Traed madera!» Groucho les pide a sus hermanos que consigan toda la madera del tren donde viajan para alimentar la caldera de la máquina a vapor. Hacha en mano, van dejando el tren destartalado, mientras este no para de ganar velocidad, siguiendo su acelerada marcha incluso después de descarrilar.

La quema de combustibles fósiles, cada vez en mayores cantidades, es lo que ha provocado el acelerado calentamiento global. Si seguimos echando madera (carbón, petróleo, gas natural) a la caldera, el proceso irá aún más rápido, pero si dejamos de alimentarla, a pesar de las inercias que comentábamos al final del anterior apartado, el tren en el que viajamos poco a poco irá perdiendo velocidad hasta finalmente detenerse sin llegar a descarrilar. Ese es el objetivo de la descarbonización: amortiguar la subida de la temperatura global al ritmo al que lo viene haciendo en las últimas décadas y que, llegado un momento, se invierta la tendencia y comience a descender. Para lograrlo tenemos que replantear nuestro actual modelo energético, aparte de llevar a cabo una profunda transformación social, que abarque desde medidas individuales (algunas de las cuales se expondrán en el siguiente apartado) hasta políticas, que miren por el bien común, el de la humanidad, velando en todo momento por la preservación del planeta. No podemos seguir esquilmando sus recursos a demanda, sin ningún tipo de control que garantice la sostenibilidad.

En noviembre de 2019, un mes antes de que se celebrara la COP25

en Madrid, bajo la presidencia de Chile, algo más de 11.000 científicos firmaron una declaración de emergencia climática, en base a una revisión exhaustiva de las numerosísimas investigaciones sobre el cambio climático publicadas en los últimos cuarenta años. En dicho documento se advierte que estamos ante un fenómeno que puede empezar a convertirse en algo catastrófico, muy traumático para la población humana, si no cambiamos profundamente nuestro modo de vida y adoptamos una serie de medidas, que se resumen en seis asuntos fundamentales o puntos clave. El primero de ellos hace alusión a las fuentes de energía y plantea que debemos cambiar nuestro modelo energético actual, pasando de consumir masivamente combustibles fósiles a apostar por las energías renovables.

HAGAMOS RIZOMA CON EL CLIMA

«Mucho texto», dicen mis hijos cuando les estoy explicando algo y piensan que ya no necesitan más rollo patatero, lo han pillado a la primera y es suficiente. Hay una cosa que me tranquiliza y es que lo que también han pillado a la primera es la preocupación por la situación del planeta; esto tiene mala pinta, parece que el mundo roto que les dejamos no tiene arreglo… Nosotros, sus padres, vivimos en un mundo que tiene el crecimiento económico como motor único, pero ya hemos visto que las consecuencias de no hacerlo de modo sostenible pueden ser nefastas. Lo vemos aquí mismo, en Murcia, en el colapso del Mar Menor.

Como artista, desde hace décadas hago una obra que solo rinde pleitesía a la observación de la naturaleza. Nubes, icebergs, hierbas, cualquier cosa que observemos con atención es una obra de arte y cualquier intento nuestro comparado con la perfección de la naturaleza es un juego pueril. La naturaleza es el arte de Dios, decía Dante. Ahora es imprescindible que los hombres abandonemos nuestro interés particular y actuemos como lo hacen las hormigas o las abejas, como un todo coordinado para salvar el hormiguero o el panal.

En mayo del 68, los filósofos Deleuze y Guattari definieron el

concepto de rizoma, esa supuesta raíz común única de las grandes extensiones de hierbas, y hasta señalaban que también un hormiguero o un rebaño de ñus pueden funcionar como un rizoma. Y gritaban a los cuatro vientos: «¡Haced rizoma y no raíz, no plantéis más! (…). El árbol es filiación, pero el rizoma tiene como tejido la conjunción y…y…y…». Y así nos invitaban a sumar esfuerzos. Ojalá lo consigamos.

JORGE FIN

Pintor de nubes y de otros elementos de la naturaleza

Muchas personas, entre las que posiblemente se encuentre usted, piensan que ese es el camino que hay que seguir, incluyendo o no en el mix energético a la energía nuclear (sobre la que hay división de opiniones), pero el problema son los plazos de tiempo: ¿cómo llevamos a la práctica la descarbonización con la urgencia requerida? La pregunta no tiene una fácil respuesta. Una cosa sí que está clara: cuanto más tiempo pase antes de iniciar la transición energética, menos eficaz será la mitigación y, en consecuencia, más subirá la temperatura y mayores serán los impactos.

El sector del transporte es uno de los que más pronto debería de ponerse las pilas y reconvertirse, ya que sus emisiones representan un porcentaje significativo (alrededor del 20 %) del total de GEI que emitimos a la atmósfera. Cuando alguien se plantea cambiar de vehículo las dudas son enormes, ya que, aunque se habla cada vez más de vehículos eléctricos, el mercado del automóvil todavía no puede responder a una gran demanda, ni existe la infraestructura necesaria, al margen de otra serie de limitaciones, incluidas las grandes inversiones económicas que tiene que hacer la industria automovilística. A corto plazo el coste de la reconversión es alto, pero a largo plazo el modelo de transporte terrestre sostenible reportará múltiples beneficios, que incluso se han cuantificado en términos económicos. El Banco Mundial señala un ahorro de 70.000 millones de dólares en 2050 si para entonces logramos movernos con vehículos sin motores de combustión.

El transporte marítimo también requiere de una reconversión urgente. Los buques mercantes en la actualidad son muy contaminantes. Al margen de la porquería que sueltan al aire y al agua en las rutas por donde transitan, sus emisiones de CO_2 a la atmósfera suponen el 3 % mundial, pero ese porcentaje podría subir hasta un 17 % con las previsiones de crecimiento que baraja la Organización Marítima Internacional. Para no ir hacia ese escenario, los objetivos de reducción deben ser ambiciosos. Pasan por medidas como la integración de velas o aerogeneradores para el aprovechamiento eólico en los barcos y la reducción de su velocidad, aunque probablemente la más eficaz de todas ellas sea un menor tránsito de mercancías. Esto entronca con el decrecimiento —al que dedicaré unas líneas algo más adelante— y el cambio profundo de nuestro modelo de sociedad, del que hablaré en el próximo apartado.

La aviación también lleva unos años buscando las fórmulas que la permitan cumplir con el objetivo de la descarbonización en 2050. De todo lo que emiten los aviones, un tercio es CO_2 y los dos tercios restantes, otros gases y también aerosoles y partículas como el hollín. Aunque el CO_2 que aportan directamente los aviones a la atmósfera solo representa el 1,5 % del total proveniente de las actividades humanas, si se tienen en cuenta el resto de las contribuciones de la aviación, el porcentaje asciende al 3,5 %. Aparte de eso, las estelas de condensación que generan a su paso también contribuyen a reforzar el calentamiento global.

Las estelas son nubes altas, catalogadas como homogenitus (creadas por el hombre) en la última edición del Atlas Internacional de Nubes de la OMM, publicada en 2017. En zonas donde abundan forman una pantalla que atrapa parte del calor que la superficie terrestre irradia hacia el espacio, contribuyendo a aumentar el efecto invernadero. Cuantas menos estelas haya, menos calor terrestre quedará atrapado en la baja atmósfera, pero el problema es que el tráfico aéreo mundial es enorme. Antes de la pandemia volaban diariamente unos 100.000 aviones comerciales por toda la Tierra. Tras la importante reducción en el número de vuelos, en 2022 se estima que alcanzaremos el 84 % de los valores prepandémicos. Muchos vuelos y muchas estelas, particularmente abundantes en las zonas donde hay un gran tráfico aéreo.

Pensando en medidas de mitigación de cambio climático aplicadas a la aviación, aparte de la implementación progresiva de combustibles de nueva generación que reduzcan significativamente las emisiones, también se pueden reducir las estelas. A principios de 2020 unos científicos del Imperial College de Londres indicaron en un estudio que bastaría con modificar ligeramente la altitud de crucero de los vuelos para que no se formaran gran parte de las estelas. Según sus estimaciones, tan solo un 2,2 % de los vuelos en el mundo son responsables del 80 % del calentamiento relacionado con las estelas de condensación. Este dato invita al optimismo y hace viable la mitigación de parte de lo que contribuye la aviación al calentamiento global.

HACIA UN NUEVO CLIMA

A mediados del siglo XXI habremos normalizado situaciones que hasta tan solo unas décadas antes figuraban en los anuarios meteorológicos por ser récords históricos. El paso de las estaciones se percibirá más por la duración del día que por la temperatura, el viento o la lluvia, ya que en una sola semana de verano se vivirán granizadas y olas de calor, y todos los inviernos traerán días cortos pero abrasadores seguidos de episodios de ventiscas heladoras. Normalizaremos los contrastes fuertes y la energía despiadada de tormentas inusuales. Echaremos de menos la llovizna. De hecho, nadie recordará qué significa exactamente aquello del orbayu y del txirimiri.

FERNANDO VALLADARES

Ecólogo. Investigador del CSIC. Museo Nacional de Ciencias Naturales

La descarbonización exige transformar la industria y modificar el mix energético, eliminando de él de forma progresiva pero rápida

(con la urgencia requerida) los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). En los últimos años han caído entre mis manos muchos escritos que abordan el asunto de las fuentes de energía en el contexto climático actual. Le confieso que no tengo una idea completamente formada del asunto. Es ciertamente complejo y complicado. La apuesta por las renovables parece segura, pero no son la panacea y su generalización conlleva impactos en el medio ambiente no del todo bien cuantificados, aparte del incremento en la demanda de algunas materias primas que no son particularmente abundantes. Siempre hay que confiar en las mejoras tecnológicas y en la mayor eficiencia de los dispositivos y sistemas que se vayan desarrollando, pero en mi opinión las renovables (energía eólica, solar «fotovoltaica», hidroeléctrica, mareomotriz, geotérmica…) por sí solas no podrán abastecernos de toda la energía que necesitemos, incluso en ese mundo sostenible que muchos deseamos.

En lo que respecta a la energía nuclear, si debe o no formar parte del mix energético, es un asunto que tiene muy mala prensa, que genera mucho miedo a la población (avivado por los medios de comunicación), pero que debe abordarse de manera reflexiva, analizando los pros (bajas emisiones en su ciclo completo de vida) y los contras (el riesgo de accidentes y los residuos). Lo haré de forma muy somera, a modo apunte. El gran potencial de las renovables es un hecho incuestionable y debe apostarse por ellas, pero, tal y como acabo de indicar, no podrán garantizar toda la demanda energética salvo en determinados momentos, a menos que se reduzca de forma drástica el consumo global de energía, lo que solo puede venir de la mano de una transformación muy profunda de nuestra sociedad, que de momento no se otea en un horizonte muy cercano.

Si seguimos con un modelo económico y social parecido, aunque sea cada vez más sostenible, la energía nuclear no parece una mala opción para dar soporte a la eólica, la solar y la hidroeléctrica cuando estas no lleguen a cubrir la demanda. Un mix energético con un 60 % de renovables y un 40 % de nuclear pienso que es factible de aquí a 2050, un 80-20 lo veo complicado y un 100 % renovable lo veo imposible. El debate no debería de ser nuclear sí o nuclear no, sino el papel que debe desempeñar la nuclear de aquí a mediados de siglo, al margen de que a lo largo de los próximos

treinta años seamos también capaces de producir energía procedente de la fusión. Un desmantelamiento rápido de las nucleares conlleva a corto plazo un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, que es justamente el objetivo contrario al que se persigue.

LA NEUTRALIDAD CLIMÁTICA COMO OBJETIVO

Mi propuesta para conseguir la llamada neutralidad climática en 2050, considerada por el IPCC como la única posible para mitigar las graves consecuencias del calentamiento global, es una combinación de varias herramientas centradas en cuatro ejes: (1) tenemos que mejorar la eficiencia energética, no entendida como retroceder al medievo, sino optimizar todos los consumos energéticos eliminando los superfluos; (2) necesitamos electrificar toda nuestra economía, comenzando por el transporte por carretera y siguiendo con el marítimo y aéreo, los hogares, la agricultura, la minería y la industria; (3) debemos aumentar la captura de dióxido de carbono, tanto reforestando zonas como trabajando en la captura industrial; y finalmente (4) necesitamos generar toda nuestra electricidad con energías bajas en emisiones de gases de efecto invernadero, en función de los recursos energéticos de cada país. Una combinación adecuada de energías renovables y nuclear ha demostrado ser la forma más eficiente de reducir las emisiones y la ruta más recomendada por los principales organismos internacionales.

ALFREDO GARCÍA FERNÁNDEZ

Supervisor de la Central Nuclear de Ascó (@OperadorNuclear)

A comienzos de 2022, algo antes de escribir esta parte del libro, la Comisión Europea propuso que tanto la energía nuclear como el gas natural sean consideradas sostenibles, lo que hace que puedan verse

beneficiadas de las subvenciones que disfrutan las fuentes de energía renovables. La propuesta generó mucha polémica y la oposición, entre otros, del Gobierno de España. Entre los Estados miembros de la Unión Europea hay división de opiniones. En la propuesta de la Comisión llama bastante la atención que se incluya al gas natural dentro del paquete de fuentes renovables. Lo cierto es que no podemos prescindir de él hasta que las citadas fuentes de energía vayan ganando más peso en el mix energético. La cuestión se ha complicado desde el momento en que Rusia (el mayor exportador de petróleo y gas natural del mundo) comenzó la invasión de Ucrania, ya que el suministro de gas ruso en muchos países europeos deja de estar garantizado.

Al margen de las incertidumbres que plantea la actitud desafiante de Rusia y otras muchas piedras que vayan surgiendo en el camino, creo que la descarbonización por sí sola no mitigará el cambio climático. Necesitamos ir un paso más allá y plantearnos también como medida alternativa de mitigación el decrecimiento económico. Empieza a haber científicos que ven imposible que no se supere a mitad de siglo el grado y medio (posiblemente lo veamos hacia el año 2030), y ven como un reto muy difícil que no lleguemos a los $+2\,^{\circ}C$. Ahora bien, si se tienen en cuenta escenarios de decrecimiento, aplicados a las principales economías del mundo y grandes emisores de $CO2$, se abre una ventana de oportunidad para lograr estabilizar la subida global de la temperatura en el ansiado $+1{,}5\,^{\circ}C$. Es una vía que se tiene que explorar, ya que por la del crecimiento insostenible nos estamos haciendo trampas a nosotros mismos y el objetivo parece cada vez más inalcanzable.

UN PROFUNDO CAMBIO SOCIAL

En la medida en que el clima está cambiando, también lo debe ir haciendo nuestra sociedad. No hay que esperar a que el propio forzamiento climático provoque un cambio indeseado, que nos dirija hacia un mundo decadente o incluso al colapso en una situación extrema, sino que debemos adelantarnos e impulsar nosotros mismos el cambio, pero por una vía adecuada, contribuyendo a la mitigación del cambio climático, aparte de adoptar medidas de adaptación y resiliencia. El modelo social actual, basado en un crecimiento económico sin límites —insostenible a todas luces— debe ser revisado. Todo pasa porque vayamos reduciendo la huella de carbono, teniendo como objetivo último la descarbonización, sobre la que ya hemos hablado.

Cualquiera de nosotros o cualquier actividad humana, como la fabricación de un producto industrial, la celebración de un concierto, viajar en coche o una explotación ganadera conlleva la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, que puede computarse en masa o cantidad de CO2 equivalente. La huella de carbono es un indicador ambiental destinado a conocer ese dato; bien de una persona, bien de una industria, de una actividad o de un determinado producto.

Se puede calcular, por ejemplo, la huella de carbono de una bolsa de zanahorias que compramos en el supermercado. Para ello, hay que estimar lo que han supuesto —en términos de emisiones— todos los procesos implicados; desde las distintas labores agrícolas que culminaron con la recolección de las zanahorias, hasta la generación del plástico de la bolsa, el proceso de envasado y el transporte. Todo suma. En función de cómo se lleven a cabo las distintas tareas, la citada huella será mayor o menor. Lo ideal es que tuvieras un huerto y tú mismo produjeras tus propias zanahorias, pero la realidad es que la mayoría de nosotros las compramos en el supermercado o, en el mejor de los casos, en la frutería del barrio. Hoy en día, no resulta sencillo acceder al dato de

la huella de carbono de cualquier cosa que compremos o que hagamos. Existen algunas páginas en internet que permiten hacer el cálculo, pero no es algo que esté al alcance de todo el mundo y debería de estarlo.

HAY QUE TOMAR CONCIENCIA

Como se ha podido observar a lo largo de los años, el cambio climático se está convirtiendo en una amenaza real cada vez mayor que hay que tener en cuenta. Los patrones meteorológicos desproporcionados, el aumento de las temperaturas o la emisión de gases son algunos signos del riesgo que representa la variación climática. Es muy difícil tener una percepción exacta de cómo será el clima en el año 2050; sin embargo, si sigue la misma trayectoria que el clima en la actualidad, se puede decir que irá a peor. Es posible que los avances tecnológicos ayuden a equilibrar la tendencia observada, pero confiar solo en eso puede llegar a ser iluso por nuestra parte. Eslóganes falsos, proyectos irreales e ideas populistas derivan en una falta de conciencia. Para evitar que 2050 sea un año de parámetros climáticos desmesurados, deberíamos empezar a entender que el cambio climático es un problema real, que ya existe.

Mientras sigamos metidos en la espiral consumista, la temperatura seguirá subiendo, causando devastación. Si no actuamos ahora, 2050 probablemente sea terrible, con temperaturas extremas y estragos en el medio ambiente que pueden acabar con distintas especies de animales, flora e incluso dificultar la vida humana en la Tierra. Deberíamos empezar a concienciarnos del peligro que ya supone el cambio climático y a partir de ahí comenzar a gestionar proyectos dirigidos a reducir el consumo y sanar nuestro planeta.

RUBÉN VIÑAS GONZÁLEZ

Estudiante de 4º de la ESO

Muchas personas desbordadas por todas las informaciones que circulan sobre el cambio climático y percibiendo que su magnitud es cada vez mayor, se preguntan: «¿Y yo qué puedo hacer?» Con frecuencia, se pide a la ciudadanía emprender acciones imposibles para la mayoría de los individuos, como tener coches eléctricos o cubrir las necesidades energéticas de sus viviendas con fuentes exclusivamente renovables, como la solar. Dicho así suena muy bien, pero, hoy en día, no es algo viable para la mayoría de la gente.

Aunque no soy mucho de recetarios ni de dar consejos, creo que en esta parte del libro es oportuno rescatar un decálogo que hace algún tiempo comenté por la radio. Se plantean en él acciones sencillas que cualquiera de nosotros puede llevar a cabo sin grandes esfuerzos, destinadas a ir cambiando algunos de nuestros hábitos. Todas ellas contribuyen a reducir la huella de carbono y nos irán llevando de manera natural al nuevo modelo de sociedad al que tenemos que aspirar.

REGULAR BIEN LA TEMPERATURA DE NUESTRA VIVIENDA

En general, en invierno nuestras casas están a una temperatura mayor de la necesaria y en verano las personas que tienen aire acondicionado bajan en exceso el termostato. Actuando así no somos eficientes desde el punto de vista energético, apenas ganamos en confort térmico y, además, gastamos más dinero. La temperatura ideal de una vivienda en invierno es de 22 °C y en verano de 25 °C, grado arriba, grado abajo. Como no todas las personas autorregulamos igual la temperatura, habrá quien con esos 22 °C en invierno note algo de frío, pero basta con ponerse la ropa adecuada en casa —no ir en manga corta— para estar a gusto. Al margen de lo anterior, si la vivienda tiene un buen aislamiento, reduciremos significativamente el consumo de energía para calentarla en invierno y enfriarla en verano.

USAR BOMBILLAS DE BAJO CONSUMO

En los últimos años hemos ido viendo cómo las luces de tipo LED de bajo consumo han ido desplazando a las tradicionales bombillas incandescentes. Estas siguen siendo las más baratas, aunque consumen mucho más, por lo que el dinero que te ahorras al comprarlas te lo gastas luego en la factura de la luz (desorbitada en los últimos tiempos por el agitado panorama internacional y la manera en que se gestiona el sector eléctrico). Merece la pena comprar bombillas LED. Cuestan bastante más que las de filamento, pero a largo plazo saldremos ganando. Las de eficiencia energética A+ o A++ gastan hasta un 80 % menos que las tradicionales. Su mayor precio lo compensa con creces su mayor duración. Una de las comunes dura hasta diez veces más que una bombilla clásica. La diferencia de consumo es también considerable. Una LED de tres vatios equivale a una de treinta de las normales. Todo son ventajas.

USAR MÁS EL TRANSPORTE PÚBLICO, IR EN BICICLETA Y CAMINAR

Pensando principalmente en las personas que viven en las grandes ciudades, todo el tiempo extra que quitemos a los desplazamientos en vehículo particular implica menos emisiones de CO2 y de contaminantes al aire. Habrá veces que no podremos prescindir del coche, pero lo que hay que intentar siempre es racionalizar su uso. Hay que usar más el transporte público, lo que debe potenciarse desde las distintas administraciones, lo mismo que el uso de la bicicleta, que exige adaptar la vía pública para ello. En definitiva, poner las cosas fáciles al ciudadano. Si podemos ir caminando a un sitio, salvo que esté demasiado lejos, es una estupenda opción, aunque en coche se tarde solo cinco minutos. Lo de los 10.000 pasos al día está muy bien, pero hay que ser realistas; son del orden de siete kilómetros y muchas personas no disponen de tiempo para caminar esa distancia cada día, ni de la capacidad física para ello. De lo que se trata es de coger el hábito, aunque solo sean dos o tres kilómetros diarios.

LLEVAR LOS NEUMÁTICOS EN BUEN ESTADO

Esto es algo muy importante que se suele descuidar mucho. Por un lado, nuestra seguridad está en juego y, por otro, el estado de los neumáticos está relacionado con el consumo del vehículo (su eficiencia energética) y también con la contaminación del suelo y del aire, ya que su desgaste al rozar con el asfalto genera partículas de caucho y sustancias químicas nocivas para el medio ambiente y la salud. Hoy en día, cada marca de neumáticos tiene modelos del segmento ECO, que presentan menos resistencia a la rodadura, lo que se traduce en un menor consumo. Una vez que cambiamos las ruedas de un coche, es importante vigilar su estado, tenerlas siempre infladas a la presión adecuada y no dejar que se desgasten más de la cuenta.

CONSUMIR ALIMENTOS DE CERCANÍA Y TEMPORADA Y LLEVAR UNA DIETA MEDITERRÁNEA

La globalización, que indudablemente está unida a la prosperidad y el desarrollo que ha experimentado la población humana en las últimas décadas, tiene también su lado oscuro: una gran huella de carbono que está provocada, en parte, por situaciones tan absurdas e irracionales como comprar naranjas producidas a miles de kilómetros de distancia en un país exportador de las mismas, teniendo excedentes suficientes para abastecer el mercado interior. Si vamos llevando a la práctica lo que proclama este punto 5 del decálogo, en un país como España (extrapolable a otros muchos), contribuiremos a la agricultura y ganadería autóctonas, reduciendo la huella de carbono, que en el caso de los productos importados procedentes de lugares lejanos es altísima. Es una buena medida tratar de consumir preferentemente frutas y verduras de temporada. Nos hemos acostumbrado a comer melón o zumo de naranja en cualquier época del año, pero eso es poco sostenible, aparte de la pérdida de calidad del producto.

Al margen de lo anterior, llevar una dieta como la mediterránea beneficia tanto a nuestra salud como a la del planeta. Se ha demonizado en exceso el consumo de carne roja y procesada y alabado en igual medida una práctica como el veganismo.

Situándonos en esos dos extremos no iremos por la senda correcta. El mensaje de no consumir carne está calando en mucha gente joven, que lo está llevando a la práctica desde el extremismo, y eso tampoco es bueno. Sí lo es reducir el consumo de carne, ya que se ha disparado a nivel global y eso tiene principalmente dos impactos en el clima: 1) la emisión de metano procedente del ganado vacuno, que se ha llegado a cuantificar y empieza a ser significativa y 2) el cambio de uso de suelo. Se están deforestando grandes extensiones de terreno para cultivar plantas forrajeras destinadas a alimentar a las vacas, pollos, cerdos y demás animales que consumimos en demasía. Ese cambio masivo de uso de suelo se traduce en una menor absorción de CO2 de la atmósfera.

Reducir el consumo excesivo de carne y aumentar el de frutas y verduras es, sin duda, beneficioso desde todos los puntos de vista. Si nuestra dieta fuera dando prioridad a alimentos vegetales con alto valor proteico, como las lentejas, judías y frutos secos, frente a los cárnicos, se frenaría la deforestación antes apuntada. Hay que fomentar ese tipo de alimentación combinada, adaptada lógicamente a las particularidades de cada país.

REDUCIR EL USO DE PLÁSTICO Y PAPEL

La Tierra, literalmente, se está llenando de plásticos y cualquier acción que llevemos a cabo para frenar su producción será positiva. El pago de las bolsas de plástico en los supermercados para limitar su uso está muy bien, pero sigue habiendo demasiado plástico en el envasado de los productos. Pensando en la fruta, por ejemplo, tratemos de comprarla por piezas al peso. Si se va extendiendo esa costumbre, la plastificación irá a menos. Con los envases de papel y cartón, así como en los embalajes y la paquetería pasa algo parecido. Se ha disparado el comercio electrónico y nos traen a casa todo en cajas de cartón. Es comodísimo para nosotros y esa es la trampa, ya que ese comercio global tiene un elevado impacto medioambiental. Debemos tomar conciencia de ello y no ser partícipes de la espiral de consumo en la que nos hemos metido (hablo desde la generalidad).

RECICLAR MÁS Y REUTILIZAR MÁS

Nos hemos convertido en una sociedad de usar y tirar. Lo que se tire hay que reciclarlo bien, pero hay que intentar no tirar tantas cosas como tiramos y reutilizarlas. Eso se ha hecho toda la vida, pero parece que se nos ha olvidado. Se hace un agujero en el bolsillo de un pantalón y se tira y se compra otro; se estropea un pequeño electrodoméstico y en vez de intentar arreglarlo (no siempre será posible), se tira y se compra otro. La producción mundial de todas esas cosas es gigantesca y es posible gracias a una explotación de materias primas (recursos naturales) sin precedentes a lo largo de la historia de la humanidad. Reciclando y reutilizando las cosas que pasan por nuestras manos no contribuiremos tanto a alimentar a la bestia y a que haya ropa, dispositivos electrónicos o una oferta de cualquier otra cosa que se nos ocurra, por encima de nuestras necesidades.

REDUCIR EL CONSUMO DE AGUA

Derrochamos demasiada agua. Particularizando para el caso de España, según datos de la Fundación Aquae, cada ciudadano consume, en promedio, 190 litros de agua al día, de los que más de dos tercios se utilizan en los baños, tanto en el aseo diario —en unas duchas que se prolongan más tiempo del necesario— como en las descargas del inodoro. Una primera acción consiste en ducharnos en no más de cinco minutos. Una segunda, muy sencilla, es tener siempre un cubo en la bañera de casa o junto al plato de ducha e ir llenándolo cada vez que nos duchemos y usar esa agua para utilizar en el retrete. De esta forma, ahorraremos varias cisternas al día (varios litros). Estas pequeñas acciones debemos adoptarlas como una costumbre, con independencia de que estemos o no en período de sequía.

INFORMARSE ADECUADAMENTE DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Esto exige por parte de cada uno de nosotros un pequeño esfuerzo por buscar las fuentes fiables y los interlocutores válidos. No

debemos dejarnos arrastrar por las informaciones poco rigurosas o directamente falsas que circulan, por ejemplo, en redes sociales, ni por un exagerado catastrofismo. Hay mucho ruido mediático y no siempre resulta fácil extraer el grano de la paja. Confío en que lo que lleva de lectura de este libro le esté resultando provechosa y útil y dé por bien aprovechado el tiempo que está dedicando a ello.

PASAR DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA

Sobre cada uno de los nueve puntos anteriores de este decálogo hay escritos libros enteros. Tan solo he querido esbozar unas cuantas acciones fáciles de acometer. Hay muchísimas más cosas que pueden hacerse para reducir la huella de carbono, pero lo importante no es la lista de tareas en sí, sino que las ponga en práctica (en el caso de que no esté haciéndolo ya). También es importante el efecto contagio, y que las personas de su entorno (familia, trabajo, amigos), animados por usted, también pasen a la acción y aporten su granito de arena para transformar entre todos nuestra sociedad hacia un modelo sostenible, acorde con los nuevos tiempos.

Aparte de los cambios de hábitos en la población, las ciudades también tienen que evolucionar por una senda adecuada. Según datos de Naciones Unidas, son responsables del 70 % de las emisiones de GEI de origen antrópico a la atmósfera, aparte de ser los principales focos de contaminación atmosférica a escala global. En la medida en que vayan cambiando nuestras ciudades, mejorará la calidad del aire (ergo la salud de los ciudadanos que las habitan) y también se reducirá su contribución al calentamiento global.

FORTALECER EL EQUILIBRIO

Creo que el clima dentro de unos años va a ser más variable de lo

que es ahora, con cambios más acusados y a los que va a ser más difícil adaptarse. Las variaciones climáticas existen desde siempre, claro, pero por un lado han sido, salvo excepciones, lentas, y por otro lado la historia humana ha ocurrido en un período en el que hemos encontrado formas de vivir adaptadas al equilibrio climático que nos hemos encontrado.

Pero parece que viene una época convulsa en lo climático. Y eso va a suponer dos retos importantes. Uno, tratar de minimizar nuestra contribución a esos cambios, de modo que se suavicen lo más posible. Y dos, tratar de establecer los mecanismos que nos permitan adaptarnos.

Las olas de calor serán menos dañinas si nuestras ciudades tienen más árboles, las inundaciones menos devastadoras si construimos de forma razonable. Las sequías o los huracanes causarán menos descalabros a una agricultura cuyas prácticas no dejen nuestros campos a merced de sus efectos.

Creo, sinceramente, que podemos hacer que el cambio climático sea más o menos llevadero, que este equilibrio del que nosotros y nuestros compañeros de planeta disfrutamos sea más fuerte, menos frágil, y por tanto más sostenible. En el pasado hemos resuelto retos cada vez mayores y tengo mucha confianza en que sabremos también hacer frente a este. Tenemos una ciencia muy desarrollada, una tecnología muy capaz, y confío en que sabremos construir la voluntad que nos permita emplearlas en fortalecer nuestro equilibrio ante las variaciones del clima.

EDUARDO SÁENZ DE CABEZÓN

Matemático y divulgador científico

En la actualidad, algo más de la mitad de la población mundial vive en ciudades; cifra que se incrementará hasta las dos terceras partes (un 66 %) en 2030. Si no queremos que aumente el impacto de las ciudades en el devenir climático, tenemos que transformarlas, lo

que pasa por una mejor planificación urbana, por hacer que los edificios sean mucho más eficientes desde el punto de vista energético, por llenarlas de zonas verdes, peatonalizarlas y porque las emisiones de gases y partículas contaminantes de los vehículos se reduzcan drásticamente. Todo esto exige una profunda transformación de las áreas urbanas de aquí a mediados de siglo.

LAS MIGRACIONES CLIMÁTICAS

Los seres humanos somos migrantes por naturaleza. Desde que hace algo menos de dos millones de años una parte de nuestros primeros congéneres abandonó su cuna africana y viajó hasta Eurasia, asentándose en distintos lugares, no hemos dejado de expandirnos por todos los rincones del planeta. De todas las causas que históricamente han forzado migraciones humanas, los cambios climáticos ocupan un lugar preferente. La escasez de agua en una región habitada, debida a un cambio duradero en los patrones meteorológicos, al margen de otras causas de índole no climática, ha provocado el colapso de algunas civilizaciones antiguas (mayas, acadios…), dando paso al florecimiento de otras. Ilustro esto último con un ejemplo.

Hace unos doce mil años, la región central del desierto del Sáhara era una sabana húmeda, surcada por una red de ríos y lagos, en la que no faltaba la vegetación ni una rica fauna. En ese momento de la historia se asentaron allí algunas poblaciones humanas. En la meseta de Tassili n'Ajjer, situada en el sureste de Argelia, se localizan unos abrigos rocosos donde vivían aquellos antiguos pobladores. Durante una etapa que podemos situar entre 6500 a. C. y 4000 a. C. pintaron allí escenas de caza con presencia de numerosos animales terrestres y acuáticos, como jirafas, elefantes, antílopes o rinocerontes. Algunos de ellos aparecen grabados en rocas (petroglifos).

Posteriormente, entre 4000 a. C. y 1500 a. C., el motivo que pasó a dominar las pinturas de Tassili fue el de los grandes rebaños de bóvidos conducidos por aquellos hombres primitivos, de donde se deduce que cambiaron la caza por el pastoreo. Todas estas pinturas rupestres son testigos del cambio climático acontecido en el Sáhara, mostrando gráficamente la transición del Período Húmedo Africano (iniciado alrededor del 10000 a. C.) al Gran Árido, que aconteció hacia el 4000 a. C y que convirtió en inhabitable esa región del mundo. La escasez de agua provocó finalmente un gran éxodo de

distintas tribus norteafricanas, reconvertidas en nómadas, hacia el este, asentándose en los márgenes del río Nilo, donde crearon una serie de reinos que, tras unificarse, culminaron en la fascinante civilización egipcia.

En la actualidad seguimos viendo cómo las grandes sequías de varios años de duración que acontecen en países del tercer mundo o en vías de desarrollo, tras arruinar cosechas y provocar grandes hambrunas, culminan en grandes migraciones humanas, con frecuencia impulsadas por conflictos armados. Seguro que habrá escuchado en más de una ocasión lo de las guerras del agua. El problema al que nos enfrentamos ahora con el calentamiento global es que fenómenos como las sequías y las olas de calor están volviéndose más extremos, afectando cada vez a más zonas pobladas de la Tierra y forzando esos movimientos migratorios. Como ya se ha ido contando a lo largo del libro, son muchos más los impactos ligados al aumento de las temperaturas, entre ellos la subida del nivel del mar.

Teniendo en cuenta que aproximadamente un 40 % de la población mundial vive en zonas costeras, tiene particular interés saber cómo puede evolucionar el nivel marino a lo largo del presente siglo; en particular, el alcance y magnitud de la subida que ya está en marcha y los impactos que irá teniendo y que, previsiblemente, serán cada vez mayores y más evidentes. Si lográramos avanzar por la senda del escenario de muy bajas emisiones, a finales de siglo el nivel medio del mar estaría unos 50 cm más alto que a principios de la década de 1970, mientras que para el escenario de muy altas emisiones la subida sería casi el doble, situándose como mínimo alrededor de los 70-80 cm. Las consecuencias de una subida de medio metro ya serían traumáticas. Las de casi un metro, devastadoras.

El abanico de opciones que plantea el IPCC, con los cinco posibles escenarios de emisiones que contempla, es amplio. La única certeza que tenemos es que en cualquiera de ellos —incluso en el más favorable— el nivel del mar seguirá subiendo en las próximas décadas, debido a la gran inercia térmica de los océanos y al imparable proceso de deshielo puesto en marcha. Aunque adoptemos medidas urgentes y enérgicas de mitigación, no

lograremos detener esa inexorable subida, pero sí que podemos conseguir ralentizarla, lo que a largo plazo se traducirá en unos impactos menos devastadores y más margen de tiempo para acometer medidas de adaptación en las zonas costeras más vulnerables.

Los impactos de las inundaciones están aumentando a toda velocidad en algunas regiones del mundo densamente pobladas, como ocurre en parte de Asia. Las proyecciones más recientes apuntan a un aumento muy significativo en la probabilidad de que ocurra al menos una inundación costera catastrófica al año a partir de 2050 en Bangladesh, India o China. En las zonas de costa vulnerables a ser inundadas de esos tres países asiáticos viven en la actualidad 300 millones de personas. Además, si se extiende la proyección climática hasta el año 2100, se estima que el mar cubrirá un territorio donde 200 millones de personas tienen sus viviendas. Tanto allí como en las franjas litorales de otros muchos países han ido formándose en pocos años megaciudades, tras recibir un goteo continuo de personas que vivían en zonas rurales del interior, donde un clima cada vez más extremo, en el que no faltan las sequías, les ha ido poniendo las cosas cada vez más difíciles para subsistir, iniciando el éxodo a esas ciudades costeras en busca de una vida «mejor».

Aunque hoy en día la mayoría de las migraciones climáticas se están produciendo dentro de los propios países, a medida que los suburbios de esas ciudades sigan creciendo de forma incontrolada y caótica, las condiciones de vida en ellas se deteriore y los temporales marítimos —potenciados por la subida del nivel del mar — las golpeen cada vez con más fuerza, entraremos, previsiblemente, en una segunda fase en la que oleadas de personas de esas ciudades inhabitables se desplazarán a otros lugares del mundo. Empezará a cobrar relevancia la figura del refugiado climático. Esta expresión seguramente la haya escuchado en alguna información sobre los pequeños Estados insulares, condenados a desaparecer bajo las aguas, cuyos habitantes antes o después tendrán que emigrar.

El asunto lo aborda en profundidad Miguel Pajares en su libro Refugiados climáticos. Un gran reto del siglo XXI (Raig Verd, 2020),

que he incluido en la bibliografía y cuya lectura le recomiendo. El libro contiene mucha información, datos actualizados y numerosas referencias a informes y a estudios técnicos sobre el tema. Analiza con detalle la movilidad humana y las migraciones que comienzan a producirse en el mundo debidas, en gran medida, a los impactos del calentamiento global. En la última parte de la obra, este investigador estima lo que puede aumentar el número de los refugiados climáticos, y el peligro que supone dejar que ese fenómeno migratorio crezca sin control. Para evitarlo, los países del primer mundo tienen que mover ficha, y hacerlo rápido.

EL NEGACIONISMO

Ante la realidad del cambio climático surgen dos discursos extremistas, opuestos y con frecuencia incendiarios. Uno de ellos (alimentado por muchos medios de comunicación) es el del catastrofismo irreflexivo e irracional, que plantea siempre los peores escenarios futuros posibles. Transmite la idea de que nos dirigimos hacia la peor catástrofe jamás conocida por la humanidad, lo que irremediablemente nos conducirá hasta nuestra extinción. Si bien las proyecciones climáticas, tal y como se ha expuesto, ponen encima de la mesa un escenario casi apocalíptico (el de muy altas emisiones), es solo uno de los posibles, no el único, y podemos esquivarlo.

El otro discurso niega por definición cualquier responsabilidad de los seres humanos en la evolución del clima, aunque con matices, como ahora contaré. Lo han hecho suyo los negacionistas y los autoproclamados escépticos (de la ciencia del clima que expone el IPCC), que han encontrado en las redes sociales uno de sus principales altavoces, lo que a muchos de ellos les permite publicar sus soflamas desde el anonimato, cuando no son bots. Se trata de un grupo de personas bastante heterogéneo, muchas de las cuales defienden a ultranza el neoliberalismo y sienten como una amenaza el discurso de cualquier persona que no comulgue con sus ideas, incluidos los científicos que hacen contribuciones al IPCC.

Pensando en el 2050, quizás haya que empezar a hablar más de crisis medioambiental y energética, y de sus soluciones, que de cambio climático y sus desastres: ambos van de la mano y, si solucionamos la primera, el segundo disminuirá o se atenuará con el tiempo. Confío en que para el año 2050 estos dos «errores del sistema» (el tratamiento informativo del calentamiento global y su utilización política) hayan dejado paso a una confianza mayor en las propuestas de climatólogos, meteorólogos, biólogos, arquitectos

y personas cercanas al estudio de este fenómeno.

JOSÉ A. GALLEGO

Profesor, fotógrafo, coautor del libro Atlas de Nubes y Meteoros

Por ninguna de las dos vías llegaremos a buen puerto. Si actuamos a lo loco, de forma precipitada, guiados más por el corazón que por la cabeza, iremos aparcando cada vez más la racionalidad, que es (o debería de ser) nuestra principal guía. Este modus operandi es arriesgado, pues aunque seguramente alguna de las acciones que pudieran acometerse funcionara, otras serían poco eficaces e inútiles, anulando los efectos beneficiosos de las primeras. Mucho más arriesgado (temerario, suicida…) es seguir explotando sin control los recursos naturales de la Tierra, obviando los impactos que ello tiene en el planeta y sus potenciales consecuencias devastadoras. Pan para hoy para unos pocos y mucha hambre para la mayoría mañana. Hay muchas formas intermedias de actuar entre los dos extremos, que debemos explorar guiados en todo momento por la ciencia del cambio climático.

El negacionismo no es algo nuevo que haya surgido con el calentamiento global; es una conducta humana inherente a algunos individuos y extrapolable a un sinfín de cuestiones de la vida diaria. Hemos tenido una buena prueba de ello durante la pandemia de la covid-19, leyendo y escuchando auténticas barbaridades desde el minuto uno. Negar lo evidente no obedece a una sola causa, aunque en el caso que nos ocupa tiene una fuerte carga ideológica y el temor a la transformación social de la que ya hemos hablado.

Con el paso de los años, el negacionismo climático ha ido evolucionando. Al principio se negaba el propio calentamiento global con toda una batería de argumentos que intentaba poner en tela de juicio la validez de los registros de temperatura usados por el IPCC en sus primeros informes. Se insistía en el «dopaje» provocado en ellos por las islas de calor de las ciudades y se cuestionaba su significación estadística. Posteriormente, ante el

peso de las evidencias científicas, los negacionistas comenzaron a admitir que la temperatura media global estaba subiendo, pero que ese calentamiento no era antrópico, sino debido exclusivamente a causas naturales ajenas a nuestras actividades. La última vuelta de tuerca es el llamado neonegacionismo. Ahora se admite que el ser humano está detrás del calentamiento global, pero se promueve la inacción climática, argumentando que cualquier cosa que se haga no servirá para nada. ¿Qué será lo próximo?

VI.

SORPRESAS CLIMÁTICAS

Si bien todas las proyecciones climáticas apuntan a un mundo cada vez más cálido y de clima más extremo, nada impide, a priori, que en el sistema climático emerjan procesos no previstos por los modelos, que conduzcan al clima terrestre por nuevas sendas hacia territorios desconocidos. Todo ello se está estudiando a fondo, con la vista puesta en algunas regiones terrestres donde se piensa que podrían desencadenarse esos procesos, en algunos casos irreversibles. A todo ello está dedicada la última parte del libro. El hecho de que el comportamiento climático sea una caja de sorpresas no debe hacernos desconfiar de los modelos de cambio climático y de todo lo que apunta el IPCC en sus informes. Hemos de asumir que nuestro conocimiento es y siempre será limitado, y que todo lo que podemos afirmar sobre la evolución futura del clima está basado en él. Tal y como ya he afirmado con anterioridad, tenemos que asumir las incertidumbres inherentes al comportamiento climático, así como los factores imprevistos que puedan entrar en escena.

Por ejemplo, nada impide que en cualquier momento —hoy mismo, mañana, dentro de un mes o de 15 años— se produzca una gran erupción volcánica en la Tierra, lo que provocaría un rápido enfriamiento global. En este sentido, una erupción de estas características es un sistema eficaz —aparte de natural— para frenar en seco, aunque temporalmente, el calentamiento global. De momento, no somos capaces de predecir con la suficiente antelación la actividad volcánica. No tenemos un modelo de predicción que nos indique que, dentro de cinco años, por ejemplo, se producirá en la Tierra una erupción de tipo Krakatoa. Los sismólogos pueden anticipar un proceso eruptivo a lo sumo con unos días o, quizás, alguna semana de antelación, pero no más.

Si bien una hipotética megaerupción volcánica provocaría una importante bajada de la temperatura planetaria, ese cambio no sería duradero en el tiempo; a lo sumo se notaría a lo largo de tres o cuatro años. Pasado ese tiempo, los aerosoles volcánicos terminan depositándose en la superficie terrestre, concluyendo el efecto refrigerante. Se volvería a la senda del calentamiento global. La sorpresa climática, en este caso, no sería de largo recorrido. Otros cambios en el sistema Tierra sí que pueden prolongarse en el tiempo, como los que afectan (lo están haciendo ya) a las corrientes marinas, dando lugar, previsiblemente, a giros inesperados en la evolución futura del clima. En cualquier caso, ninguna de estas circunstancias invalida el conocimiento climático que hemos atesorado y en el que debemos confiar.

TERRITORIOS IGNOTOS

Tal y como apunté al inicio del capítulo, todas las proyecciones climáticas se ponen de acuerdo en plantear escenarios futuros en los que las temperaturas son más altas que las actuales. La magnitud de la subida que tendrá lugar a lo largo del presente siglo dependerá, en gran medida, de cómo vayan evolucionando las emisiones de GEI a la atmósfera, tanto las que generan nuestras actividades como las que se producen en el sistema climático de forma natural, que pueden aumentar significativamente en un mundo más caliente. En este último caso, todas las miradas están puestas en el metano, al que dedicaremos el siguiente apartado. Los climatólogos contemplan también, como hipótesis de trabajo, que en el marco del calentamiento global en el que nos encontramos puedan surgir giros inesperados en la evolución del clima.

La película El día de mañana (así se tradujo del inglés The day after tomorrow), del año 2004, dirigida por Roland Emmerich, planteaba uno de esos escenarios hipotéticos (fuera del guion de los modelos del clima) en el que un cambio climático abrupto desencadena una glaciación repentina en la Tierra, de consecuencias catastróficas. Desde hace tiempo, los científicos vigilan una serie de puntos calientes localizados en distintos lugares del planeta, conocidos como tippings points (puntos de no retorno), ya que si se superan determinados umbrales en la subida de la temperatura, podrían ponerse en marcha procesos irreversibles en el sistema climático.

El IPCC en su Sexto Informe indica que se han iniciado algunos procesos irreversibles. Esto es inquietante, ya que nos adentra en un territorio desconocido, inabordable por los modelos climáticos actuales. Entramos en el terreno de la especulación y la incertidumbre. El informe señala algunos puntos críticos en los que se están observando cambios de tal magnitud que, previsiblemente, tendrán consecuencias según vaya avanzando el siglo. Uno de ellos es la ralentización de la corriente del Golfo, ya observada, aunque no se prevé una parada completa de la misma, lo que tendría

importantes consecuencias en el clima europeo. Aunque el AR6 habla de irreversibilidad, señala también que algunos cambios podrían ralentizarse y otros podrían detenerse limitando el calentamiento. Aunque el margen de maniobra cada vez es más pequeño, todavía tenemos la capacidad de modular el clima en sentido contrario a como lo hemos venido haciendo hasta ahora.

LO QUE NOS JUGAMOS DE AQUÍ A 2050

En las próximas décadas, hasta mediados del siglo XXI, la evolución del clima estará muy condicionada por las emisiones históricas de gases de efecto invernadero cuya acumulación desde el comienzo de la Revolución Industrial ha desequilibrado el balance energético del planeta. Esta evolución, en gran medida ya comprometida por nuestras emisiones pasadas, obligará a poner especial énfasis en las medidas de adaptación al cambio climático.

Sin embargo, las emisiones de gases de efecto invernadero que se realicen desde ahora hasta 2050 marcarán de forma diferenciada las posibles evoluciones del clima tanto para finales de siglo como para los siglos y milenios venideros. La gran inercia del sistema Tierra hace que las decisiones que se tomen en los próximos años y las acciones a las que estas conduzcan —referentes al control de las emisiones de gases de efecto invernadero y a los usos del suelo— condicionarán el clima de los próximos siglos. Algunos cambios, como los referidos a los océanos, las regiones de hielo permanente y el nivel del mar, tendrán carácter irreversible en escalas temporales de siglos y milenios. Esta irreversibilidad que afectará a las líneas de costa, al paisaje, a la misma existencia de ciertas islas o países se dilucidará con las acciones que tengan lugar en los próximos años. Nunca la actividad humana ha tenido un impacto con un alcance temporal tan largo.

ERNESTO RODRÍGUEZ CAMINO

Meteorólogo de AEMET recientemente jubilado. Experto en

Como se ha indicado, una de las singularidades del cambio climático actual es su rapidez. Podemos situarlo en la frontera de lo que se conoce como un cambio climático abrupto, que podemos definirlo como un cambio a gran escala en el sistema climático y en los distintos patrones de circulación atmosférica y oceánica que entran en juego, que se desencadena de forma rápida, brusca, en un lapso de tiempo corto —climáticamente hablando—, que puede ir desde unas pocas décadas hasta apenas unos cuantos años. Los registros paleoclimáticos permiten deducir que han ocurrido algunos de estos cambios climáticos abruptos en el pasado. El impacto del asteroide que provocó en tiempo récord la última extinción masiva ocurrida en la Tierra (la quinta) es un ejemplo de ello. En otras ocasiones, el desencadenamiento de uno de esos cambios ha sido interno, cuando en el sistema climático se ha rebasado un determinado umbral crítico. La posibilidad de que ahora, en el marco del calentamiento global, se produzca uno es puramente especulativa.

Hay una decena larga de lugares del mapamundi donde los climatólogos han marcado la cruz que señala los puntos críticos que pueden conducir al clima por territorios ignotos. Varios de ellos se concentran en las regiones polares, tanto en el Ártico como en la Antártida. La fusión del permafrost y la liberación masiva de metano es uno de ellos, así como la reducción hasta la mínima expresión de la banquisa ártica o la pérdida masiva de hielo continental tanto en Groenlandia como en la Antártida. Todos ellos inciden directamente en el comportamiento de las corrientes oceánicas y en la circulación termohalina (de la que hablaremos algo más adelante), lo mismo que un cambio de patrón en la Oscilación del Sur (El Niño y La Niña). También se pone el foco de atención en algunos componentes sensibles de la biosfera, como la selva amazónica, la Gran Barrera de Coral o los bosques boreales.

Si las temperaturas siguen subiendo al ritmo actual o mayor, muchos ecosistemas terrestres que ahora actúan como sumideros de carbono pasarán a ser emisores netos, lo que aceleraría más el calentamiento global, entrando en un círculo vicioso (una

retroalimentación positiva). Si de aquí a 2050 no reducimos drásticamente nuestras emisiones de CO2 a la atmósfera, se estima que del orden de la mitad de los ecosistemas terrestres comenzarán a alterar el ciclo del carbono. El punto de inflexión tiene lugar cuando la velocidad a la que la vegetación libera carbono a la atmósfera comienza a ser mayor que la velocidad a la que lo atrapan.

Según una reciente estimación, tanto los bosques tropicales como la taiga (que son los ecosistemas que más biomasa almacenan) podrían perder más del 45 % de su capacidad de sumidero de carbono a mediados del presente siglo. Cuando veo las imágenes de enormes masas forestales ardiendo tanto en el ámbito tropical como en Siberia, no dejo de pensar en las implicaciones que ello puede tener, complicando todavía más el difícil reto climático al que nos enfrentamos. Las emisiones de metano es otro de los asuntos que me inquieta, ya que puede ir llevándonos por una senda opuesta a la que tenemos que irnos encaminando; por un escenario que ni siquiera plantea el IPCC.

EMISIONES DE METANO

La principal acción humana destinada a mitigar el cambio climático y tratar de evitar que el calentamiento global siga aumentando al ritmo actual o mayor, pasa por reducir drásticamente las emisiones de GEI a la atmósfera provenientes de la quema masiva de combustibles fósiles. Siento ser tan repetitivo, pero es importante transmitir esa idea, ya que la tecnología por sí sola no logrará los objetivos de mitigación si no vamos cerrando el grifo de lo que soltamos al aire.

Aunque el CO2 es el gas del que más se habla, no debemos olvidarnos del metano (CH4), que emitimos en grandes cantidades como consecuencia de muchas de nuestras actividades. A la hora de cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero es habitual referirse de manera genérica a las emisiones de carbono o a las de CO2 equivalente (aunque suele omitirse este término), incluyendo implícitamente en ellas a las de metano, salvo que se especifique lo contrario y se informe aparte de las mismas.

El metano es un hidrocarburo presente en la atmósfera como un gas traza, variando su concentración tanto en el espacio como en el tiempo. Incoloro e inflamable, es el segundo gas que más contribuye al efecto invernadero terrestre, por detrás del vapor de agua. Aunque nuestras emisiones de metano son mucho menores que las de CO2 (representan algo menos del 15 %), es un GEI hasta veinticinco veces más eficaz atrapando calor, si bien su tiempo de residencia en la atmósfera es mucho menor, por lo que sus efectos se manifiestan a más corto plazo. Se estima que aproximadamente el 25 % del calentamiento global observado desde el inicio de la Revolución Industrial ha sido debido al aumento de la concentración de metano en la atmósfera. Desde entonces, se ha multiplicado por dos su concentración, gracias, en gran medida, a nuestras emisiones.

La covid-19 y la guerra de Ucrania han puesto la lucha contra el cambio climático en un segundo plano, pese a la realidad de eventos climáticos extremos cada vez más frecuentes, intensos y duraderos que YA se están desarrollando en todo el planeta. Si no se actúa con urgencia, ambición, solidaridad y globalmente, el futuro será terrible, tal como anuncia el Sexto Informe del IPCC. Los costes de dichos eventos equivalen a varias pandemias y varias guerras.

El PERO que da origen al escenario distópico es que fallan la voluntad política y la gobernanza, aflorando el nacionalismo y el cortoplacismo. El horizonte utópico es que existe hoja de ruta y capacidad industrial/tecnológica para solventar el problema. Apostemos por una gobernanza reinventada para solucionar los graves problemas globales.

CARLOS SALLÉ

Ingeniero industrial. Director de Políticas Energéticas y Cambio Climático del Grupo Iberdrola entre 2014 y 2020

El metano tiene un origen tanto natural como antrópico. La descomposición de la materia orgánica vegetal genera este gas, produciéndose en grandes cantidades en las ciénagas y los terrenos pantanosos. Los animales rumiantes representan también una importante fuente de emisión, de ahí lo de intentar poner el freno al consumo masivo de carne. Por otro lado, es el principal componente del gas natural, y forma parte también del resto de combustibles fósiles. En los últimos años se están vigilando con especial cuidado las emisiones de metano en las regiones polares y subpolares cubiertas de permafrost, ya que el deshielo de parte de ese terreno congelado está liberando una cantidad creciente de este gas a la atmósfera y eso podría contribuir a acelerar el calentamiento global.

Aunque se han hecho esfuerzos por reducir nuestras emisiones de metano y hubo un decenio de estabilización en su concentración atmosférica a escala global (entre 1998 y 2007) que invitaba al

optimismo, la curva volvió a apuntar hacia arriba, con una tendencia al alza por encima de lo que cabría esperar, que no se justifica solo por lo que nosotros hemos ido emitiendo. Todo apunta a que también están entrando en juego las emisiones naturales de este gas, ajenas a nuestras actividades, aunque no al calentamiento global, ya que el imparable ascenso de las temperaturas está despertando de un largo letargo al metano que durante millones de años ha permanecido congelado en el permafrost y en los fondos oceánicos.

Por lo que a nosotros respecta (acción climática), según una evaluación del PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) las emisiones antrópicas de metano podrían reducirse casi a la mitad de aquí a 2040, restando tres décimas de grado a la temperatura que tengamos a mediados de siglo. Si, paralelamente, vamos reduciendo nuestras emisiones de CO2, el objetivo del grado y medio fijado en el Acuerdo de París se ve más asequible, no como algo poco menos que imposible de alcanzar. Aunque el camino no será fácil, es la forma de mitigación más eficaz que tenemos a nuestro alcance y esto es algo que debe saberse.

Estamos ante un desafío global. No basta con que solo unos pocos países hagan los deberes; todos tienen que remar en la misma dirección. Solo así podremos ir alcanzando los distintos objetivos. La principal dificultad reside en las abismales diferencias que hay entre el primer y el tercer mundo, aparte del freno que los países emergentes deberían autoimponerse para no seguir creciendo como lo están haciendo, a imagen y semejanza de los países desarrollados. Siendo optimistas y pensando en que gracias a la cooperación internacional iremos reduciendo nuestra huella de carbono y construyendo un mundo cada vez más sostenible, tendremos que bailar al son de lo que vaya dictando la naturaleza. Con la vista puesta en el metano de origen natural, tenemos que estar preparados ante el posible aumento de las emisiones y sus imprevisibles consecuencias.

Cada vez son más frecuentes las noticias que alertan del rápido e inexorable descongelamiento del permafrost de las regiones boreales, especialmente abundante en el extenso territorio ruso

ocupado por la tundra siberiana. El citado permafrost, tal como puede deducirse del acrónimo con el que es conocido internacionalmente, es el nombre que recibe aquel terreno que permanece siempre congelado, salvo una pequeña fracción sometida a una fusión estacional, que se corresponde con la parte más superficial de dicho suelo. La magnitud alcanzada ya por el calentamiento global en latitudes altas del hemisferio norte está empezando a descongelar una parte del permafrost. Ese proceso conlleva la liberación de gases atrapados en la materia orgánica —congelada hasta ese momento—, con el CO2 y, sobre todo, el metano a la cabeza.

Al margen de las observaciones de campo llevadas a cabo en distintas campañas científicas, que certifican la fuga de metano, se están produciendo cambios acelerados en la geomorfología del permafrost. Cada vez abundan más las ciénagas, lagunas de deshielo y terrenos encharcados, también se forman, a veces, abombamientos del suelo, que delatan la presencia de una gran bolsa o burbuja de metano por debajo. Pero el fenómeno más llamativo es la formación de cráteres, algunos de ellos de considerables dimensiones. Una de las zonas donde empezaron a aparecer, hace unos años, es la península de Yamal, en el norte de Rusia, bañada por el océano Glacial Ártico, si bien se han documentado en otras regiones de la inmensa tundra siberiana.

En torno a estos cráteres han surgido todo tipo de especulaciones, pero todo apunta a la subida de las temperaturas como su principal causa. Cuando la acumulación de metano en el subsuelo comienza a ser grande, la bolsa resultante, en expansión, ejerce una presión cada vez mayor sobre la capa de terreno superficial, hasta que esta no resiste más y salta por los aires, formándose el boquete. Algunos de estos cráteres llegan a alcanzar los cincuenta metros de diámetro y tienen una considerable profundidad, similar a la de una pequeña sima. La fuga de metano, tanto al aflorar bruscamente a la superficie esas bolsas de gas como a través de las grietas y fisuras presentes en esos terrenos en fase de deshielo, es un fenómeno que escapa a nuestro control y todo apunta a que irá a más. Teniendo en cuenta el gran reservorio de metano del actual permafrost, esa liberación del gas a la atmósfera nos pondrá todavía más difíciles las cosas para intentar poner freno al calentamiento global.

El metano no solamente está presente en las grandes bolsas de gas natural y otros combustibles fósiles que extraemos, procesamos, transportamos y quemamos, ni en el citado permafrost; también se encuentra formando grandes reservorios en numerosos lugares situados bajo el lecho marino, en unas condiciones de presión y temperatura que permiten la existencia de los llamados hidratos de gas (metano). Esta sustancia, formada por una mezcla de metano y agua, permanece congelada y tiene su origen en la descomposición de las distintas especies que viven en el medio marino, en combinación con agua salada cerca de su punto de congelación, lo que ocurre en las profundidades abisales.

Hace ya algunas décadas empezaron a localizarse los lugares del mundo (decenas de ellos) en los que hay hidratos de gas, en un intento por explotar una nueva fuente de energía fósil, si bien se comprobó que la extracción de los hidratos conllevaría grandes emisiones de metano en forma gaseosa, inasumibles si queremos reducir nuestra aportación de ese gas a la atmósfera. En el marco del calentamiento global, hace algún tiempo empezaron a detectarse fugas de metano provenientes de los hidratos de gas.

La sorpresa saltó en 2020, al descubrirse una importante fuga de metano en una zona oceánica próxima a la costa brasileña. Fue la primera vez que se observó este proceso en el hemisferio sur, lo que invita a pensar que la subida de la temperatura se está transmitiendo a más zonas profundas de los océanos, con la consiguiente desestabilización de los citados hidratos de gas. Si el calentamiento global sigue su curso, parece probable que aumentarán las emisiones de metano tanto procedentes del permafrost como de los lechos marinos donde se localizan los hidratos de gas. Dependiendo de la magnitud que vayan alcanzando esas aportaciones, nuestras acciones para reducir el metano que generamos tendrán un peso mayor o menor en la mitigación del cambio climático.

CLAVES OCEÁNICAS

Aunque el cambio climático nos lleva a pensar de inmediato en el acelerado calentamiento atmosférico y en los impactos, cada vez más evidentes, asociados a ese aumento de la temperatura del aire a escala global, el gran modulador del clima terrestre y de su evolución en los próximos decenios, siglos y milenios es el océano y, en particular, el comportamiento futuro que vayan teniendo las corrientes que lo recorren, tanto a nivel superficial como profundo.

La dinámica de los océanos juega un papel fundamental en el estudio del cambio climático. La mayor parte de la radiación solar que incide en la Tierra lo hace sobre la superficie oceánica, pero a diferencia de lo que ocurre en la atmósfera, donde los cambios de temperatura se manifiestan con rapidez (pequeña inercia térmica), en los océanos son mucho más lentos, en escalas de tiempo mucho mayores, tal como se explicó en el capítulo 3. Mientras que en los primeros doscientos metros (océano superficial) se requieren de semanas a meses para que empiece a subir o bajar la temperatura en respuesta a un forzamiento externo, la transmisión de esos cambios a las profundidades marinas lleva siglos.

El comportamiento de los océanos se rige por unas ecuaciones matemáticas de mecánica de fluidos análogas a las usadas en dinámica atmosférica, si bien las distintas propiedades del agua y el aire marcan algunas importantes diferencias a la hora de abordar el problema. En ambos componentes del sistema climático hay corrientes, que se encargan de transportar masa y energía de unas zonas a otras. Si pensamos en el calor que nos llega del Sol (energía radiante) y en la Tierra en su conjunto, la zona ecuatorial recibe anualmente más radiación solar de la que deja escapar al espacio (superávit), mientras que en las regiones polares ocurre justo lo contrario: el balance de energía solar entrante-saliente es negativo (déficit). En la atmósfera, la circulación general es la encargada de compensar esas diferencias, transportando calor del ecuador hacia los polos, aunque no mediante una sola célula de circulación en

cada hemisferio. El mecanismo de transporte es algo más intrincado, en respuesta a otros factores que influyen también en el movimiento del aire. ¿Qué ocurre en los océanos?

Por un lado, el fuerte acoplamiento atmósfera-océano hace que en las regiones terrestres donde dominan determinados regímenes de vientos, estos induzcan corrientes superficiales marinas que se desplazan en la misma dirección. Sin embargo, esas corrientes no son representativas del gigantesco transporte de masas de agua y de energía que tiene lugar en los océanos. Forman parte de un complejo entramado, en el que hay también corrientes profundas, que son las principales moduladoras del clima a largo plazo.

El esquema equivalente en el océano al de la circulación general de la atmósfera es la llamada circulación termohalina, también conocida como «cinta transportadora global». Este modelo conceptual fue propuesto a principios de los años 90 por el geofísico estadounidense Wallace S. Broecker, a quien debemos la expresión «calentamiento global», tal y como se indicó en el prefacio. La palabra «termohalina» hace referencia a la temperatura y la salinidad (contenido de sal), ya que en los océanos los cambios en estas dos variables son los que rigen los movimientos verticales de las masas de agua, dando origen a la citada circulación de aguas profundas, que conecta las distintas cuencas oceánicas, transportando el calor almacenado en ellas, aunque muy lentamente. Emplea entre 500 y 1000 años en repartir la energía calorífica absorbida del aire en contacto con la superficie de los océanos, para terminar devolviéndola a la atmósfera.

El agua más densa es aquella que está más fría y salada. Ocurre a veces que un agua a mayor temperatura se hunde más que una más fría porque es mucho mayor su salinidad, que es lo que vemos que pasa con el agua mediterránea en el estrecho de Gibraltar, que discurre por debajo del agua atlántica, bastante más fría. La «cinta» está dotada de movimiento gracias a tres zonas principales de hundimiento de agua fría y salada. Dos de ellas se localizan en el Atlántico Norte, en el límite de la banquisa polar: una en el mar de Labrador, al sur de Groenlandia, y otra al oeste del mar de Noruega; la tercera está en el mar de Weddell, en el océano Glacial Antártico. Esas zonas de generación de masas de agua profunda son los

motores de la circulación termohalina. Las cantidades de agua que se hunden cada segundo en ese par de regiones oceánicas situadas al norte y sur de la Tierra son del orden de los diez a quince millones de metros cúbicos, lo que nos da una idea de la potencia de este mecanismo de transporte.

La masa de agua profunda que se genera en el Atlántico Norte comienza un lento viaje hacia el sur, cruzando el ecuador en dirección a la Antártida. Allí se une a la corriente Circumpolar Antártica (presente tanto en las profundidades como en superficie), que es la mayor corriente fría del planeta y rodea el continente blanco de oeste a este. De ella surgen dos ramas ascendentes que recorren los océanos Índico y Pacífico, ganando «altura» a medida que se desplazan hacia el norte. Tras aflorar hasta la capa superficial (convertidas en corrientes cálidas de agua menos salada), inician el camino de retorno hacia el sur, para, tras unirse en el Índico, bordear el cabo de Buena Esperanza y enfilar hacia el norte, cerrándose «la cinta» en las frías aguas atlánticas donde se inició el periplo.

El balance de los flujos de calor y agua dulce en el Atlántico Norte es clave en la dinámica de la cinta transportadora. Son fáciles de intuir las implicaciones que puede tener un cambio en dicho balance en la evolución futura del clima. Los científicos llevan años vigilando el acelerado deshielo del Ártico; en particular el de Groenlandia, ya que está aportando grandes cantidades de agua dulce al océano que, aparte de contribuir a la subida del nivel marino, podría empezar a ralentizar la circulación termohalina. El gigantesco entramado de corrientes oceánicas superficiales y profundas se vería alterado y el clima terrestre entraría en un territorio desconocido, que de momento los modelos climáticos no plantean. La circulación termohalina es clave en el cambio climático, ya que su comportamiento futuro dictará en buena medida la evolución y magnitud que vaya teniendo el calentamiento global.

Los océanos manifiestan signos cada vez más evidentes del citado calentamiento. Su condición de gran sumidero de carbono es lo que hace que la subida de la temperatura de la parte baja de la atmósfera se mueva todavía dentro de unos límites tolerables,

aunque con una tendencia cada vez mayor a aumentar. Las aguas oceánicas han absorbido cerca de la mitad del CO_2 que los seres humanos hemos ido emitiendo a la atmósfera de forma descontrolada desde el inicio de la Revolución Industrial, con un notable incremento en las últimas décadas, lo que implica la acumulación de una gran cantidad de calor que está empezando a distribuir la «cinta». Su capacidad de absorción de dióxido de carbono se ha ido reduciendo, rondando en la actualidad el 23 % del CO_2 que emitimos anualmente.

La subida de la temperatura no se manifiesta aún en la totalidad del gigantesco volumen de agua oceánica, pero ya lo está haciendo en su capa superficial, prácticamente en todas las latitudes terrestres y profundidades de esa parte superior, llegando a detectarse por debajo en algunas regiones oceánicas. Mientras que la respuesta de la atmósfera es rápida al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero, en los océanos, tal y como ya hemos comentado, se requiere de más tiempo. Deberán pasar algunos siglos para que la enorme cantidad de calor que se ha ido acumulando en esas aguas someras se vaya distribuyendo por el resto y alcance la totalidad de las profundidades marinas. A lo largo de ese lento proceso, parte del calor regresará a la atmósfera, lo que reforzará el calentamiento global.

Los modelos climáticos llevan tiempo pronosticando el ascenso de la temperatura en la capa superficial de los océanos, pero está siendo más rápido de lo esperado, lo que inquieta a los científicos por las implicaciones que podría tener en escalas de tiempo de décadas e incluso menos años. Los impactos de ese acelerado calentamiento de la capa superficial oceánica ya se perciben y previsiblemente irán a más, no siendo exagerado afirmar que la evolución futura del cambio climático va a depender, en gran medida, de cómo se vayan comportando los océanos.

La absorción masiva de CO_2 por parte de los océanos y el calentamiento derivado de ella está teniendo tres principales consecuencias: la subida del nivel del mar, la acidificación de las aguas y los impactos en la fauna marina, agudizados por las distintas formas de contaminación (microplásticos, eutrofización…). El exceso de CO_2 disuelto en el agua marina es responsable del

blanqueamiento de los corales, lo que está teniendo un impacto muy negativo en la biodiversidad de los mares tropicales, aparte de las migraciones que están viéndose obligadas a hacer algunas especies marinas, peores adaptadas que otras a los cambios ambientales.

A todo lo anterior hay que sumar las alteraciones en los patrones meteorológicos y la intensificación de fenómenos meteorológicos ya de por sí extremos, o de los ríos atmosféricos (grandes pasillos que transportan un aire muy cargado de humedad desde el ámbito subtropical hacia latitudes más altas), debido a la presencia cada vez mayor de extensas áreas oceánicas con el agua a una temperatura varios grados por encima de lo que era normal hasta hace poco.

La subida del nivel del mar, aunque se cuantifique en poco más de tres milímetros al año, en promedio global desde los años 90 (con un significativo aumento en la tasa de aumento en el período 2013-2021 [4,5 mm/año]), es inexorable y convierte a las costas en lugares cada vez más vulnerables a los temporales marítimos, asociados a borrascas y ciclones tropicales. Estos sistemas meteorológicos disponen, además, cada vez de más energía, proporcionada por una superficie oceánica cada vez más cálida, lo que los convierte en más intensos y peligrosos.

El calentamiento global está poniendo a prueba la capacidad de adaptación y de supervivencia de muchas especies marinas, y también nos está exponiendo a los seres humanos a un creciente número de impactos. Las perspectivas a medio y largo plazo apuntan a una respuesta cada vez mayor (más rápida) de los océanos. Aunque los modelos climáticos vaticinan más calor, la acumulación de CO_2 en los océanos y las alteraciones en las corrientes marinas pueden, quizás, dar lugar a giros inesperados que nos lleven a escenarios distintos a los proyectados.

Quedan muy pocos lugares en la Tierra donde no se detecte, en mayor o menor medida, la señal del calentamiento global. Estamos acostumbrados a ver mapas globales de anomalías de temperatura en los que año tras año y mes tras mes, desde hace ya mucho tiempo (demasiado), predominan de forma clara las anomalías positivas (colores rojos, naranjas y amarillos) sobre las negativas

(colores azules). Es una forma gráfica muy directa de ver cómo actúa el calentamiento global. En todos esos mapas llama la atención la «gota fría», de color azul, que aparece al sur de Groenlandia e Islandia. Esa región del Atlántico Norte va con el paso cambiado y no para de encadenar anomalías negativas de temperatura.

La singularidad, conocida como cold blob (burbuja fría), ha llamado la atención de los científicos y su razón de ser reside en la desaceleración observada en la AMOC (circulación meridional de retorno del Atlántico Norte), aunque un reciente estudio también apunta a otros factores como un aumento de la nubosidad sobre esa zona atlántica. Dicha deceleración se ha cuantificado en un 15 % desde mediados del siglo XX y no tiene precedentes en los últimos mil años, lo que refuerza la idea de que estamos ante un tipping point, que se explica razonablemente bien por la acelerada pérdida de hielo que está teniendo lugar en Groenlandia y en otras zonas del Ártico, y los grandes aportes de agua dulce que eso conlleva, con la consiguiente alteración de las corrientes marinas en el Atlántico Norte.

El mar de Beaufort, que es el depósito de agua dulce más grande del océano Ártico, ha aumentado su contenido de agua dulce en un 40 % durante las últimas dos décadas y esa gran masa de agua podría alcanzar el mar de Labrador, en la costa este de Canadá, y desde allí desalojar en el Atlántico y sumarse a la que está aportando el deshielo de Groenlandia. Si el volumen de agua dulce que hay ahora acumulado en el mar de Beaufort alcanzara el Atlántico Norte, las alteraciones en la AMOC podrían ser importantes y eso, a su vez, tendría consecuencias en el clima.

La referida AMOC es un entramado de corrientes marinas superficiales y profundas, de las que la corriente del Golfo es la principal por el volumen de agua que desplaza. Cartografiada por primera vez por Benjamin Franklin (1706-1790) en 1770, la citada corriente transporta agua cálida desde el extremo sur de la península de Florida y las Bahamas hasta las inmediaciones de Islandia y —a través de distintas ramas— las costas atlánticas del continente europeo, desde las noruegas, al norte, hasta las portuguesas, al sur. Su caudal, antes de dividirse en los distintos

ramales, llega a alcanzar los 80 m^3/s, con picos por encima de los 100 m^3/s, con una velocidad media del agua que transporta de entre 6 y 7 km/h. Durante las últimas décadas se está ralentizando, lo que ha hecho que esté en el punto de mira de los climatólogos.

Como ya hemos contado, en la actualidad la subida global de las temperaturas se está cebando especialmente en el Ártico, donde la pérdida neta de hielo es notable. Los grandes aportes de agua dulce de deshielo de Groenlandia al Atlántico Norte, en la zona antes referida, se están produciendo donde tiene lugar un importante hundimiento de agua fría y salada generada por el proceso de congelación estacional de la banquisa ártica, lo que constituye uno de los motores que ponen en marcha la cinta transportadora de calor oceánica. Esos aportes de agua dulce (menos densa que el agua salada que va para el fondo cuando se forma la costra helada en la superficie marina) irán ralentizando la cinta. De seguir la tendencia actual, el debilitamiento de la AMOC (y por tanto de la corriente del Golfo) a finales de siglo podría ser un 35 a 40 % mayor que el observado en la actualidad.

El clima de la fachada atlántica de Europa es menos extremo que el de la norteamericana, en buena parte por el efecto atemperador de la corriente cálida del Golfo, que transporta aire templado al Viejo Continente. Si la circulación termohalina va perdiendo fuelle y llegara a detenerse, se cortaría ese flujo de aire templado y las masas de aire polar camparían a sus anchas, se reforzarían y ganarían terreno hacia el sur, iniciándose, previsiblemente, una miniglaciación, aunque en este caso no estaría provocada por factores astronómicos (ciclos de Milankovitch) que indujeran una menor entrada de energía procedente del Sol a la Tierra.

Sin llegar a ese caso extremo, ciertamente paradójico, si la corriente del Golfo sigue ralentizándose en las próximas décadas, el clima europeo, teóricamente, tenderá a ser más frío, sobre todo en invierno, lo que rebajará la magnitud de la subida de la temperatura prevista en Europa en los diferentes escenarios climáticos. Aunque a nivel teórico lo anterior parece lógico que vaya ocurriendo, nos falta todavía conocer mejor la AMOC y sus distintas interrelaciones en el sistema climático para lograr modelizar su comportamiento futuro con un alto nivel de confianza.

A día de hoy, ningún modelo climático plantea el escenario hipotético de la parada de la corriente del Golfo y la entrada en escena de un cambio climático abrupto capaz de provocar una miniglaciación en tiempo récord en Europa.

EPÍLOGO.

UN RETO SIN PARANGÓN EN LA HISTORIA HUMANA

Cuando me embarqué en la redacción de este libro, la pandemia de la covid-19 desplazó de un plumazo de la primera línea informativa al cambio climático (declarado ya por entonces emergencia climática), repitiéndose una circunstancia parecida más recientemente, en febrero de 2022, al iniciarse la guerra de Ucrania con la invasión rusa. Ambos hechos, aunque muy diferentes, me dan pie para escribir unas últimas reflexiones en voz alta sobre distintas cuestiones que han ido apareciendo a lo largo del texto, y en las que, seguramente, he sido repetitivo.

Por un lado, la pandemia que puso el mundo patas arriba, en estado de shock, a principios de 2020 hizo que miles de virólogos, epidemiólogos y un largo etcétera de especialistas de muy variadas disciplinas científicas se pusieran a trabajar a contrarreloj en la búsqueda de la vacuna que pudiera protegernos del peligroso coronavirus. Era una situación excepcional, de emergencia, que requería una acción colectiva rápida, urgente. La incertidumbre inicial hizo que se dieran algunos palos de ciego, sí, pero fue gracias a la ciencia como logramos ganarle parcialmente la batalla al virus y pararle los pies. Lamentablemente, ha habido muchas bajas en el camino (6.300.000 fallecidos en todo el mundo según las estadísticas oficiales mientras escribo estas líneas, a finales de mayo de 2022), pero uno o dos órdenes de magnitud menos que las que llevaríamos si se hubiera impuesto la sinrazón del discurso anticientífico de no pocos antivacunas.

En el caso del cambio climático hay también miles de científicos que investigan desde hace años los entresijos del clima terrestre y sus variaciones. La diferencia con los primeros es que estos últimos no van a poder crear una vacuna que detenga el calentamiento global; a lo más que aspiran es a conocer cada vez mejor el sistema

climático, a reducir las incertidumbres derivadas de su complejidad y a ofrecer unas proyecciones climáticas que nos guíen cada vez mejor en la toma de decisiones. A falta de esa imposible vacuna, lo único que nos queda es la adopción de las medidas de adaptación y mitigación que se reclaman y, también, (y no menos importante) llevar a cabo una reflexión profunda, tanto personal como colectiva, sobre lo que nos ha traído hasta aquí y por qué senda queremos caminar, tanto nosotros como las generaciones futuras.

Se nos abre una ventana de oportunidad para cambiar el mundo a mejor. Así tenemos que verlo aunque el futuro pinte negro, con unos colores rojos cada vez más oscuros en la gráfica del calentamiento a rayas. El cambio climático ya está aquí. Estamos asistiendo a un variado surtido de impactos que nos afectan cada vez más de lleno, con unos costes económicos más inasumibles cada año que pasa. Cuesta trabajo entender la inacción que ha habido desde que hace más de tres décadas la comunidad científica empezó a advertir de la necesidad de reducir nuestras emisiones de GEI a la atmósfera, pero todavía estamos a tiempo de revertir la situación.

El camino no será fácil y menos a corto plazo (¡ojalá me equivoque!). El conflicto bélico en Ucrania introduce un factor de incertidumbre adicional a nuestro ya incierto de por sí porvenir climático. La necesaria descarbonización puede sufrir un retraso inasumible a estas alturas de la película. El calentamiento global solo se puede abordar desde la globalidad, con medidas consensuadas por todos los países en cuestiones fundamentales como las fuentes de energía, la explotación de los recursos naturales, el transporte o el comercio mundial. Estamos ante el mayor reto al que jamás se ha enfrentado la humanidad. Nos jugamos el futuro; ese futuro mejor que todavía es posible. La acción climática aparte de rápida tiene que ser global, no nos queda otra.

LA BIBLIOTECA DEL CLIMA

En la bibliografía que le ofrezco a continuación encontrará libros con unos contenidos asequibles, que le permitirán profundizar en muchos de los asuntos abordados en Nuestro reto climático. Cuando en 2008 puse en línea mi página web (www.divulgameteo.es), tuve claro que uno de sus apartados estaría dedicado al cambio climático. En él, incluí una bibliografía de libros y monografías en castellano sobre el tema, que desde entonces no he dejado de actualizar. A día de hoy, los títulos referenciados en ella rondan los ciento treinta. Me he dejado en ellos muchas horas de lectura, que doy por bien empleadas.

Más recientemente, en septiembre de 2020, inicié mi segunda temporada como colaborador en De Pe a Pa, junto a Pepa Fernández (con la que llevo haciendo radio, en RNE, desde 2004), e introduje en la sección «El reto climático» un apartado llamado «La biblioteca del clima». En él reseño cada semana un libro de la larga lista que ha ido cayendo en mis manos en las últimas tres décadas. Cuando comento por la radio una novedad editorial, a veces Pepa y yo tenemos la posibilidad de entrevistar al autor, lo que siempre es enriquecedor para los oyentes y potenciales lectores.

La siguiente relación de libros (treinta y cinco títulos) es una selección de todos los que he reseñado hasta la fecha en el apartado homónimo de la radio. Los encontrará también referenciados en la bibliografía actualizada de mi página web. El criterio que he seguido para seleccionarlos es personal. Incliné la balanza finalmente por los libros que me dejaron un poso más duradero y esa sensación placentera de haber aprendido y disfrutado a partes iguales. Me he permitido la licencia de incluir en la lista un libro mío: el primero que escribí, hace ya casi veinte años, por la visión en perspectiva que ofrece del cambio climático. Confío en que la lectura de aquellos en los que pueda embarcarse le resulte provechosa.

ALLEY, Richard, El cambio climático. Pasado y futuro, Madrid: Siglo XXI, 2007.

ALONSO OROZA, Sergio, ¿Hablamos del cambio climático?, Bilbao: Fundación BBVA, 2011.

COMELLAS, José Luis, Historia de los cambios climáticos, Madrid: Rialp, 2011.

DUARTE, Carlos M. (coord.), Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra, Madrid: CSIC, 2006.

DUARTE, Carlos M. (ed.), Impactos del calentamiento global sobre los ecosistemas polares, Bilbao: Fundación BBVA, 2008.

DUARTE, Carlos M., Cambio climático, serie: Debates científicos, Madrid: Los Libros de la Catarata, 2011.

DUPLESSY, Jean Claude; MOREL, Pierre, Temporal sobre el planeta, Madrid: Acento, 1993.

EQUIPO DE EL TIEMPO DE RTVE,El desafío del clima, Madrid: Harper Collins, 2021.

ERICKSON, John, El efecto invernadero. El desastre de mañana, hoy, Madrid: McGraw-Hill, 1992.

ESCRIVÀ, Andreu, Aún no es tarde, Valencia: Universidad de Valencia, 2018.

ESCRIVÀ, Andreu, Y ahora yo qué hago. Cómo evitar la culpa climática y pasar a la acción, Madrid: Capitán Swing, 2020.

FIGUERES, Christiana; Rivett-Carnac, Tom. El futuro por decidir. Cómo sobrevivir a la crisis climática, Madrid: Debate, 2021.

GATES, Bill, Cómo evitar un desastre climático, Barcelona: Plaza & Janés, 2021.

GORE, Al. Una verdad incómoda, Barcelona: Gedisa, 2007.

GRIBBIN, John; GRIBBIN, Mary, Hijos del hielo. Clima y orígenes del hombre, Madrid: Ediciones Pirámide, 1992.

GRIBBIN, John, El clima futuro, Barcelona: Salvat, 1994.

JANCOVICI, Jean-Marc, El cambio climático explicado a mi hija, Fondo de Cultura Económica, 2010.

KRAUSS, Lawrence, M., El cambio climático. La ciencia ante el calentamiento global, Barcelona: Pasado y Presente, 2021.

LLEBOT, Josep Enric, ¿El tiempo está loco? Y 74 preguntas más sobre el cambio climático, Barcelona: Rubes, 2007.

LIEBERMAN, Benjamin; GORDON, Elizabeth, El cambio climático en la historia de la humanidad, Córdoba: Almuzara, 2021.

LINÉS ESCARDÓ, Alberto, Cambios en el sistema climático. Una aproximación al problema, Madrid: INM, 1990.

LYNAS, Mark, Seis grados. El futuro en un planeta más cálido, Barcelona: Librooks, 2014.

MARTÍN CHIVELET, Javier, Cambios climáticos. Una aproximación al sistema Tierra, Madrid: Ediciones Libertarias, 1999.

MARTÍN CHIVELET, Javier, Memorias de un clima cambiante. Entender el pasado para corregir el futuro. Una visión científica sobre la emergencia climática, Barcelona: Shackleton Books, 2020.

MOLINA, Mario; SARUKHÁN, José; CARABIAS, Julia, El cambio climático. Causas, efectos y soluciones, Fondo de Cultura Económica, 2017.

MONBIOT, George, Calor. Cómo parar el calentamiento global, Barcelona: RBA, 2008.

PAJARES, Miguel, Refugiados climáticos. Un gran reto del siglo XXI, Barcelona: Rayo Verde Editorial, 2020.

RICH, Nathaniel. Perdiendo la Tierra. La década en que podríamos haber detenido el cambio climático, Madrid: Capitán Swing, 2020.

TAPIA, Isidoro. Un planeta diferente, un mundo nuevo, Madrid: Deusto, 2021.

TAPIADOR, Francisco Javier, El clima de tus hijos. Cómo prepararte para la emergencia climática, Pamplona: Next Door Publishers, 2021.

VIÑAS, José Miguel, ¿Estamos cambiando el clima?, Madrid: Equipo Sirius, 2005.

WALKER, Gabrielle, Cataclismo climático. La historia de la gran catástrofe que engendró la vida moderna en nuestro planeta, Barcelona: Antoni Bosch Editor, 2007.

WALLACE-WELLS, David, El planeta inhóspito. La vida después del calentamiento, Barcelona: Debate, 2019.

WEART, Spencer, El calentamiento global, Pamplona: Laetoli, 2006.

ZAMBRANO, Luis. Planeta (in)sostenible. Colección: El Cuarto de las Maravillas, Madrid: Turner, 2019.

AGRADECIMIENTOS

Estoy en deuda con cada una de las treinta y nueve personas que han dedicado parte de su valioso tiempo a enriquecer este libro con sus visiones y reflexiones ante el horizonte de 2050. En cuanto les hablé del proyecto editorial, no tardaron ni un minuto en acceder a mi petición de preparar unos pequeños textos complementarios al que fui construyendo yo. Reunir en este libro sus aportaciones le da un especial valor, aparte de la ilusión que me hace el haber podido aunar en estas páginas tanto talento y tanta buena gente. Mis primeras palabras de agradecimiento son para Javier Martín Vide (uno de mis referentes), por su magnífico prólogo y los comentarios tan afectuosos que me ha brindado, y que son recíprocos hacia su labor y su persona. Gracias también a Teresa Ribera, vicepresidenta y ministra para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a quien agradezco enormemente que sacara tiempo de su apretada agenda para escribir su aportación al libro; a Antonio Martínez Ron (@Aberron), con quien tantas cosas buenas comparto últimamente; a Fátima Hernández, que me ha abierto las puertas del Museo de Ciencias Naturales de Tenerife; a mi apreciado Jorge Olcina, otro de mis referentes y amigo en el mundo de la climatología; a Manolo Linares, con quien nunca falta una jugosa conversación cada vez que me escapo a Asturias; a Ana Justel, mi querida «Lady Byers», a la que conocí gracias a mi aventura antártica; a Sebas Álvaro, un fuera de serie en todos los sentidos; a Nacho Pardinilla, todo bondad y una de las personas más comprometidas con la preservación de la naturaleza que conozco; a Jorge Fin, un pintor de nubes, icebergs y malas hierbas que os invito a descubrir; a Ernesto Rodríguez Camino, buen amigo y uno de los meteorólogos que más ha impulsado la modelización climática en España; a Robert Monjo, entusiasta de la meteorología y también físico enfrascado en modelos de clima, al que he visto crecer profesionalmente; a mi cuñada Paloma González y a su colega, también médico, Juan Manuel García, por su interesante aportación al libro en relación a la salud; a Fernando Valladares, uno de los

abanderados del activismo climático entre el colectivo de los científicos; a mi querida Isa (Isabel Moreno), pareja de reparto en Naukas Bilbao 2021, a la que auguro una exitosa carrera como divulgadora de estos temas; a mi prima Raquel Rodríguez Rubio, a la que pedí que escribiera sobre algo que no era su especialidad y aportó varias claves muy interesantes; a mi apreciado Joaquín Araújo, cuya precisa y preciosa prosa (llena de sabiduría) está presente en el libro gracias a su generosidad; a Leontxo García, compañero de viajes con la radio hace años, que aparte de su sapiencia ajedrecística es una persona grande por dentro y por fuera; a Juan Antonio Simarro, por su apasionada defensa de la música para cambiar el mundo a mejor; a Eduardo (Sáenz de Cabezón), con quien tengo la suerte de trabajar y disfrutar en Órbita Laika; a Federico Velázquez de Castro, referente de la educación ambiental en España; a mi buen amigo José Antonio Gallego, cuya vida reparte entre la docencia, la música y la fotografía, y no hay tormenta supercelular que se le resista; a Pedro Subijana, con quien compartí un día inolvidable (el 2 de octubre de 2019), visitando primero su templo de la gastronomía y después el Observatorio de Igueldo; al astrónomo Fernando Ballesteros, cuyas vidas se van cruzando de vez en cuando en el camino de la vida; a Alfredo García (@OperadorNuclear), que brilla en Twitter con radiación de Cherenkov propia; a mi querido y admirado Ángel Rivera, maestro de meteorólogos, que conoce como pocos lo que se cuece en la atmósfera; a Jesús Martínez Frías, al que empecé a seguir la pista en el año 2000 cuando se desató la fiebre de los «aerolitos» y cuya producción científica es apabullante y admirable; a Xurxo Mariño, que es una de las personas maravillosas que he podido conocer gracias a la divulgación científica; a Carlos Briones, otro fenómeno divulgando ciencia, y que, además, es de mi misma cosecha (la del 69); a Óscar Ayala, que hace años me brindó la oportunidad de volar en globo y, lo más importante, su amistad; a Salva (Salvador Gómez), gracias al cual vivo desde hace unos años una bonita aventura televisiva, divulgando meteorología desde la televisión pública; a mi admirado Vicente Aupí, incansable observador de los cielos tanto diurnos como nocturnos; a Enrique Coperías, mi puerta de entrada en Muy Interesante, del que admiro su capacidad de trabajo; a Carlos Sallé, por compartir conmigo valiosa información técnica sobre el cambio climático y estupendas conversaciones; a Andreu Escrivà, cuyos escritos sobre este asunto,

incisivos y sin medias tintas, nunca dejan indiferente; a Pepa Fernández, con quien llevo dieciocho años compartiendo micrófonos en RNE y tantos momentos inolvidables; a César Lumbreras, que confió en mí para ser el hombre del tiempo de su veterano programa de radio, y a mi hijo Rubén, que me sorprendió gratamente con el texto que preparó.

Para terminar, doy las gracias también a mis otros dos hijos (Sergio y Raúl), a mi mujer Susana y al resto de mi familia, por estar siempre apoyándome en los distintos proyectos en los que voy embarcándome, y a mi nueva familia de Plataforma Editorial, con Jordi Nadal a la cabeza, por confiar en mí para publicar este libro. Gracias a Miguel Salazar, que fue el que inicialmente me lanzó el anzuelo, y a mi editora Maria Salvador por cuidar hasta el último detalle todo el laborioso proceso que conlleva la publicación de este libro.

ALFABETO

Le animamos a visitarnos y, si lo desea, a ponerse en contacto con nosotros en:

www.editorialalfabeto.com

@editorialalfabeto

@EdAlfabeto

Editorial Alfabeto

¡Muchas gracias por su tiempo!